



Caractérisation du canal de propagation DVB-T appliquée à la réception en mobilité

Franck Nivole, Christian Brousseau, Stéphane Avrillon, Dominique Lemur,
François Marie, Louis Bertel

► To cite this version:

Franck Nivole, Christian Brousseau, Stéphane Avrillon, Dominique Lemur, François Marie, et al..
Caractérisation du canal de propagation DVB-T appliquée à la réception en mobilité. Journées Sci-
entifiques 2009 d'URSI-France " Propagation et Télédétection ", Mar 2009, Paris, France. pp.1.
hal-00389205

HAL Id: hal-00389205

<https://hal.science/hal-00389205>

Submitted on 28 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation du canal de propagation DVB-T appliquée à la réception en mobilité

DVB-T channel characterization in mobile configuration for vehicular reception

F. Nivole, C. Brousseau, S. Avrillon, D. Lemur, F. Marie, L. Bertel

Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes - IETR, Campus Beaulieu, 35042 RENNES, christian.brousseau@univ-rennes1.fr

Résumé

L'amélioration de la réception de la télévision numérique terrestre DVB-T (Digital Video Broadcasting on Terrestrial network) à l'intérieur des véhicules, passe par une meilleure connaissance des caractéristiques du canal de propagation. Ce papier présente la méthode utilisée pour estimer les paramètres du canal de propagation DVB-T (réponses impulsionnelles, dispersions temporelles, directions d'arrivée de signaux) dans une configuration de réception mobile ainsi que les résultats de sondages de canal réalisés. Le sondeur passif est décrit, aussi bien d'un point de vue matériel que logiciel avec les traitements d'antennes et les outils d'estimation des directions d'arrivée des ondes. Des résultats de sondage dans quatre types d'environnement sont présentés et discutés : voie express, rural, urbain et urbain dense.

Mots clés : DVB-T, COFDM, diversité, canal, sondage

Abstract

To improve the quality of the vehicular reception of DVB-T (Digital Video Broadcasting on Terrestrial networks) signal, the knowledge of the propagation channel characteristics is necessary. In this aim, this paper presents sounding methods to characterize the channel parameters (impulse response, delay spread, direction of arrival angles of waves) in mobile configuration. The mobile passive sounder is presented, including post-processing and radio direction finding tools. Then, several results in four kinds of environment are given and discussed: motorway, rural area, low density town center, and high density town center (Paris).

Key words: DVB-T, COFDM, diversity, channel, sounding

1. Introduction

L'année 2005 a vu apparaître la première offre de télévision numérique. Elle se traduit aujourd'hui par un formidable succès et un nombre incomparable de récepteurs sur le marché. En parallèle, face à ce succès, l'univers de la radiotéléphonie offre des services de plus en plus complets, dont certains sont proches de la télédiffusion : émissions de télévision rediffusées, télévision à la carte, « streaming », ... Face au succès des radiocommunications, le monde de la radiodiffusion a donc créé une complémentarité à la norme DVB-T (Digital Video Broadcasting on Terrestrial network) en ajoutant une dimension « mobilité » au récepteur. Cette variante, plus connue sous le terme de DVB-H (Digital Video Broadcasting on Handheld), tend à vouloir s'imposer dans le domaine de la télédiffusion mobile en Europe. Parallèlement, des entreprises ont commencé à réfléchir au passage de la DVB-T, historiquement fixe ou portable, vers une DVB-T mobile. Dans ce cas, la qualité de la réception dépend de nombreux facteurs comme l'influence du canal de propagation, le type d'antennes utilisées et le codage de canal employé.

Les systèmes DVB-T offre des services de télédiffusion numérique à haut débit utilisant le principe de modulation COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Cette modulation possède une grande efficacité mais est sensible au décalage Doppler, bruits et évanouissements liés à la propagation. Une façon d'améliorer la qualité de la réception DVB-T en mobilité est d'utiliser un récepteur multi-antennes allié à des algorithmes exploitant la diversité. Dans ce cas, le choix des antennes est extrêmement important et il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des phénomènes de propagation. En particulier, l'estimation des paramètres temporels et spatiaux du canal permettent de définir les caractéristiques du récepteur à diversité, des antennes ainsi que de leurs positions sur le véhicule.

Par le passé, les travaux menés au sein de l'IETR dans la bande HF (3 – 30 MHz) ont permis d'accroître notablement les débits de transmission en développant un modem utilisant des techniques de traitement du signal robustes alliées à un réseau d'antennes hétérogènes [1,2]. Il s'agit donc de s'inspirer de ces travaux pour envisager une application dans les fréquences plus hautes (VHF – UHF).

Dans ce contexte, le projet CAVITE (CAractérisation Vectorielle des canaux de propagation pour la transmission d'Image de Télévision numérique terrestre avec des mobiles) [3] a pour but d'améliorer la réception de signaux DVB-T en mobilité (voiture, train,...), caractérisée par d'importants effets de propagation (multitrajets, Doppler, étalements temporel et spatial, ...). La première partie de ce projet est d'estimer les caractéristiques spatiales et temporelles du canal. La seconde partie est de proposer des méthodes de combinaison des signaux optimales et de les tester dans des configurations de réception difficiles. Le travail présenté dans cet article concerne la première partie du projet.

Après un rappel sur les différents travaux menés autour de la réception de la DVB-T en mobilité, nous présentons le sondeur de canal de propagation multi-antennes développé au sein de l'IETR, ainsi que les méthodes de traitement utilisées pour extraire les paramètres caractéristiques du canal de propagation (réponses impulsionnelles, estimation des angles d'arrivée des ondes, ...). Les différents environnements de mesure choisis pour avoir une bonne représentation des effets de propagation (zone rurale, voie express, centre ville de faible puis de forte densité) sont décrits. Les estimations temporelles et spatiales obtenues dans ces différents environnements sont présentées et discutées et un modèle de canal de propagation avec ses paramètres est proposé. Finalement, quelques stratégies pour optimiser la réception de la DVB-T en mobilité sont préconisées.

2. Etat de l'art

Les possibilités de réception des signaux DVB-T dans un véhicule en déplacement ou à l'intérieur des bâtiments ont été étudiées dans le cadre de plusieurs projets européens comme VALIDATE, MOTIVATE, MCP et CONFLUENT.

Le projet VALIDATE (Verification and Launch of Integrated Digital Advanced Television in Europe) (1998) [4] a permis de consolider le futur de la télévision numérique terrestre en vérifiant les spécifications de la norme DVB-T en détail, en s'assurant que la planification du service reposait sur une base technique solide et en proposant des solutions aux problèmes opérationnels. Plusieurs tests ont été menés en mobilité et ont conduit à la définition du projet MOTIVATE (Mobile Television and Innovative Receivers) (1998 – 1999). Ce projet a permis l'étude de la réception mobile de la télévision numérique terrestre à l'intérieur des réseaux SFN (Single Frequency Network) et MFN (Multi-Frequency Network) [5,6]. Ce travail a été poursuivi dans le projet MCP (Multimedia Car Platform) (2000) avec une attention particulière pour les services et la possibilité de recevoir tous les types de modulation utilisés avec un récepteur à diversité [7,8]. Finalement, dans le projet CONFLUENT (2002), des tests ont été réalisés en utilisant un nouveau récepteur DVB-T à diversité [9,10].

A l'issue de ces études, deux modèles de propagation sont préconisés [9] :

- Un modèle de type TU-6 (Typical Urban) en zone urbaine,
- Un modèle de type RA-6 (Rural Area) en zone rurale.

Dans le modèle TU-6, six trajets de propagation utilisant des évanouissements de Rayleigh, ont été définis. L'amplitude relative de ces trajets est comprise entre 0 et -10 dB, avec un étalement temporel compris entre 0,2 et 5 μ s. Dans le modèle RA-6, le même type de trajets est défini mais en utilisant des évanouissements de Rice.

Parallèlement, des industriels comme « LSI Logic » ou « DiBcom », ont développés des démodulateurs DVB-T, respectivement les L64782, DIB3000-M et DIB7000-M, utilisant une réception à diversité. Ces composants possèdent deux récepteurs et combinent numériquement les signaux issus de deux antennes séparées, à l'aide d'un algorithme MRC (Maximum Ratio Combining) [11].

Mais, malgré les résultats positifs obtenus et la configuration très favorable des environnements utilisés lors des campagnes de mesures (grandes villes comme Paris, Londres, Berlin possédant des émetteurs de proximité de très forte puissance configurés en réseaux MFN), de nombreux problèmes persistent pour la réception de la DVB-T en mobilité, liés principalement à des faibles RSB (Rapport Signal sur Bruit) [12,13].

3. Sondeur passif multi-antennes et traitement du signal associé

3.1. Système de télédiffusion DVB-T français

La topologie du réseau de télédiffusion DVB-T français est de type MFN avec de grandes distances entre chaque émetteur de télédiffusion, et avec différents plans de fréquence pour le même programme télévisé dans chaque région.

Les émissions sont codées en COFDM avec les paramètres présentés dans le tableau 1 [14]. Ces paramètres sont étudiés pour une réception statique. Par contre, l'intervalle de garde n'est pas adapté à des étalements temporels importants et la modulation utilisée, MAQ-64, nécessite un fort RSB pour obtenir une bonne qualité de réception.

Mode	Intervalle de garde	Durée utile d'un symbole	Durée d'un symbole	Modulation	Rapport du code de convolution
8 k	$256 \times T_e$	$8192 \times T_e$	$8448 \times T_e$	MAQ-64	2/3

Tableau 1 : Paramètres du réseau DVB-T COFDM de télédiffusion français (avec un temps d'échantillonnage T_e égal à $7/64 \mu s$).

3.2. Système de réception multivoies

3.2.1. Introduction

Etant donné l'impossibilité d'émettre un signal dans les bandes dédiées à la télévision (bandes VHF - UHF), le sondeur réalisé est un sondeur passif qui utilise les signaux TNT diffusés, à des fins de sondage. Dans ce cas, le challenge est de pouvoir extraire l'information issue des signaux de télédiffusion DVB-T émis en polarisation horizontale avec des contraintes d'omnidirectionnalité et d'évanouissements importants, et en utilisant des antennes placées dans un coffre sur le toit d'un véhicule.

Le sondeur, réalisé à l'IETR, est constitué de quatre récepteurs superhétérodynes cohérents à double changement de fréquence. Les récepteurs sont calibrés et synchronisés en phase afin de permettre l'estimation des directions d'arrivée des ondes. La figure 1 présente le synoptique de ce récepteur.

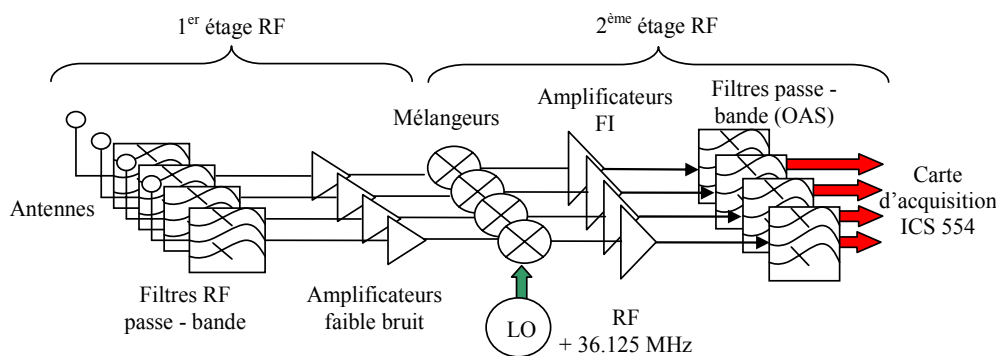


Figure 1 : Architecture RF des récepteurs utilisés pour le sondeur de canal DVB-T.

3.2.2. Système RF

Chaque récepteur utilise un filtre passe-bande RF (Radio-Fréquence) associé à un amplificateur faible bruit afin d'assurer une bonne sensibilité de réception. A l'issue du 1^{er} étage RF, le signal est converti à la fréquence de 36,125 MHz. Les brouilleurs éventuels ainsi que les canaux de fréquence de la télévision analogique sont filtrés à l'aide d'un filtre passe-bande à onde acoustique de surface (OAS). L'acquisition est effectuée à la fréquence de 100 MHz et le deuxième mélange est réalisé numériquement par un ré-échantillonnage à la fréquence de 9,145 Méch/s. La figure 2 présente une photo du sondeur réalisé.



Figure 2 : Photographie du sondeur passif 4 voies réalisé.

Parallèlement, plusieurs antennes ont été développées et testées (big wheel, patch, halo, ...) [15]. Du fait de leurs propriétés de compacité, d'omnidirectionnalité et de répétabilité, les antennes sélectionnées pour les mesures sont des « halo » [16]. Les dimensions d'une antenne halo sont présentées à la figure 3. Afin de caractériser le canal de propagation DVB-T, un réseau circulaire de 4 paires d'antennes halo couplées a été utilisé (figure 4).

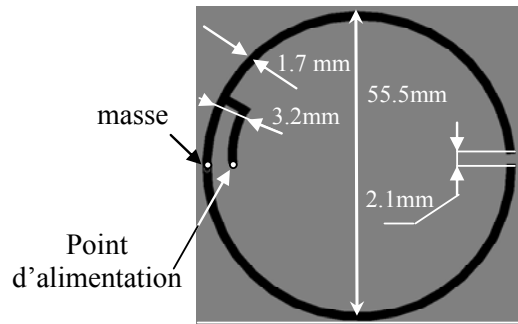


Figure 3 : Dimension d'une antenne "halo" imprimée sur un substrat FR4.

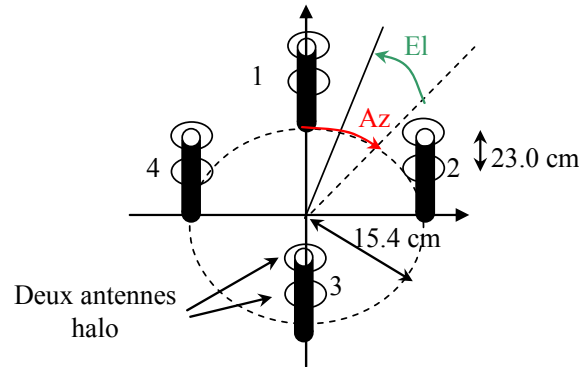


Figure 4 : Configuration du réseau d'antennes utilisé (Az : Angle d'azimut, El : Angle d'élévation).

3.2.3. Traitement des signaux associé

Les signaux utilisés par le sondeur sont issus de la télédiffusion DVB-T en mobilité. Une carte d'acquisition ICS554 permet de numériser ces signaux OFDM. Le principe du sondage consiste à estimer la réponse impulsionnelle du canal à partir de la connaissance de la structure des signaux COFDM échantillonnés.

Dans le mode 8k, chaque symbole OFDM est constitué de 6817 porteuses. Comme le montre la figure 5, celles-ci contiennent, en plus des données utiles :

- Des pilotes répartis en temps et en fréquence,
- Des pilotes continus.

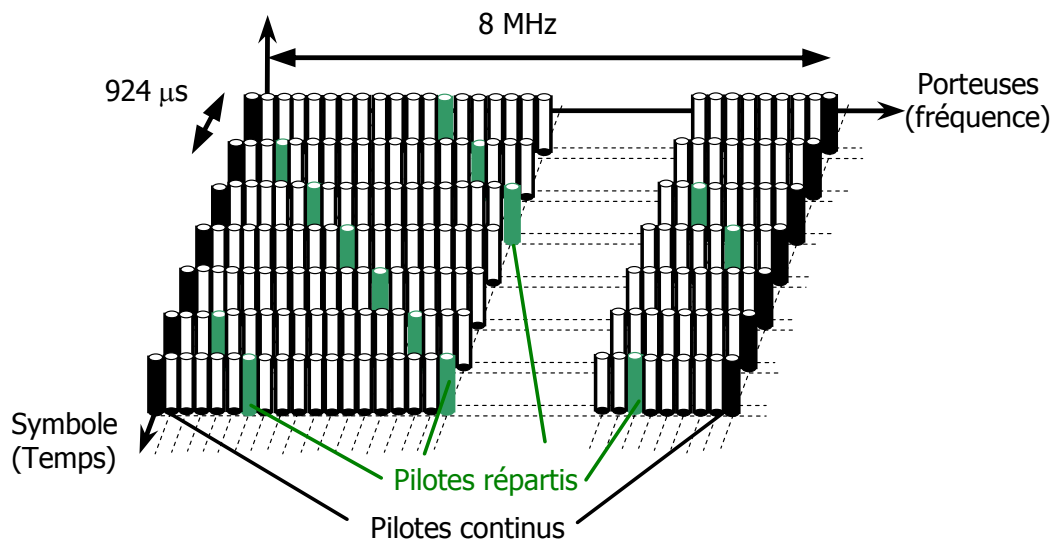


Figure 5 : Structure d'une trame OFDM montrant la position des pilotes continus et des pilotes répartis en fonction du temps symbole et de la fréquence.

Ces pilotes peuvent être utilisés pour la synchronisation des trames OFDM, pour la synchronisation en fréquence, pour la synchronisation en temps et pour l'estimation de canal. Ils sont modulés par une séquence binaire pseudo-aléatoire dont le principe de fonctionnement à base d'un registre à décalage, est présenté sur la figure 6.

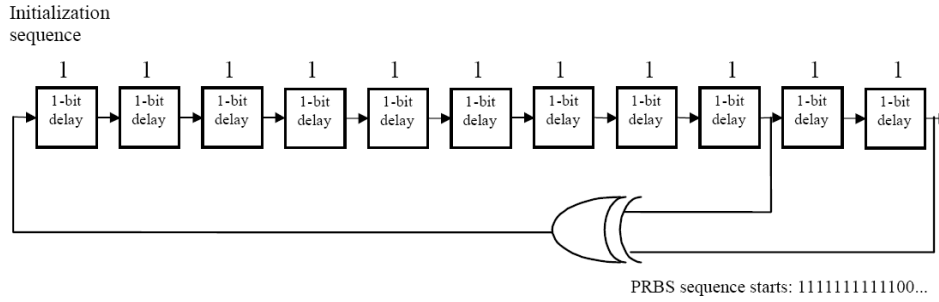


Figure 6 : Principe de génération de la séquence binaire pseudo-aléatoire [14].

Les traitements numériques appliqués aux acquisitions sont identiques à ceux réalisés dans un récepteur DVB-T classique [17,18] :

- Synchronisation grossière de la fenêtre FFT (Fast Fourier Transform),
- Correction de l'erreur fractionnaire de fréquence,
- Transformée de Fourier discrète (FFT),
- Recherche des pilotes diffusés,
- Synchronisation fine,
- Nouvelle transformée de Fourier discrète (FFT),
- Nouvelle recherche des pilotes diffusés et continus.

Après ces traitements, la fonction de transfert est obtenue par une interpolation des pilotes sur les 6817 porteuses :

$$\hat{H}_{l,k} = \frac{R_{l,k} \cdot C_{l,k}^*}{C_{l,k} \cdot C_{l,k}^*} \quad (1)$$

Avec l , le numéro du symbole, k , le numéro de la porteuse, $R_{l,k}$ le pilote démodulé, $C_{l,k}$ le pilote issu de la PRBS et $*$, l'opérateur conjugué.

La réponse impulsionnelle est ensuite obtenue par la transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert. La bande de fréquence mesurée étant de 8 MHz, la résolution temporelle de la réponse impulsionnelle est alors de 12,5 μ s.

La figure 7 présente l'interface graphique utilisateur développée pour simplifier l'utilisation de cet ensemble de traitement. Sur cette interface, quatre graphiques permettent de visualiser :

- L'estimation des réponses impulsionnelles,
- La constellation extraite des symboles COFDM mesurés,
- Le Rapport Signal sur Bruit (RSB) en fonction des symboles,
- Les données de synchronisation grossière.

3.3. Méthodes d'estimation des directions d'arrivée des ondes

Deux méthodes d'estimation des directions d'arrivée des ondes sont utilisées :

- La méthode de Capon [19],
- l'algorithme MUSIC [20].

Ces méthodes sont appliquées sur les réponses impulsionnelles issues des mesures.

3.3.1. Méthode de Capon

La méthode de Capon utilise la matrice de covariance R_{xx} calculées à partir des échantillons X de la réponse impulsionnelle du canal, définie par :

$$R_{XX} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(n)X(n)^T \quad (2)$$

Avec n , le numéro de l'échantillon, N , le nombre d'échantillons et $(.)^T$, la transposition.

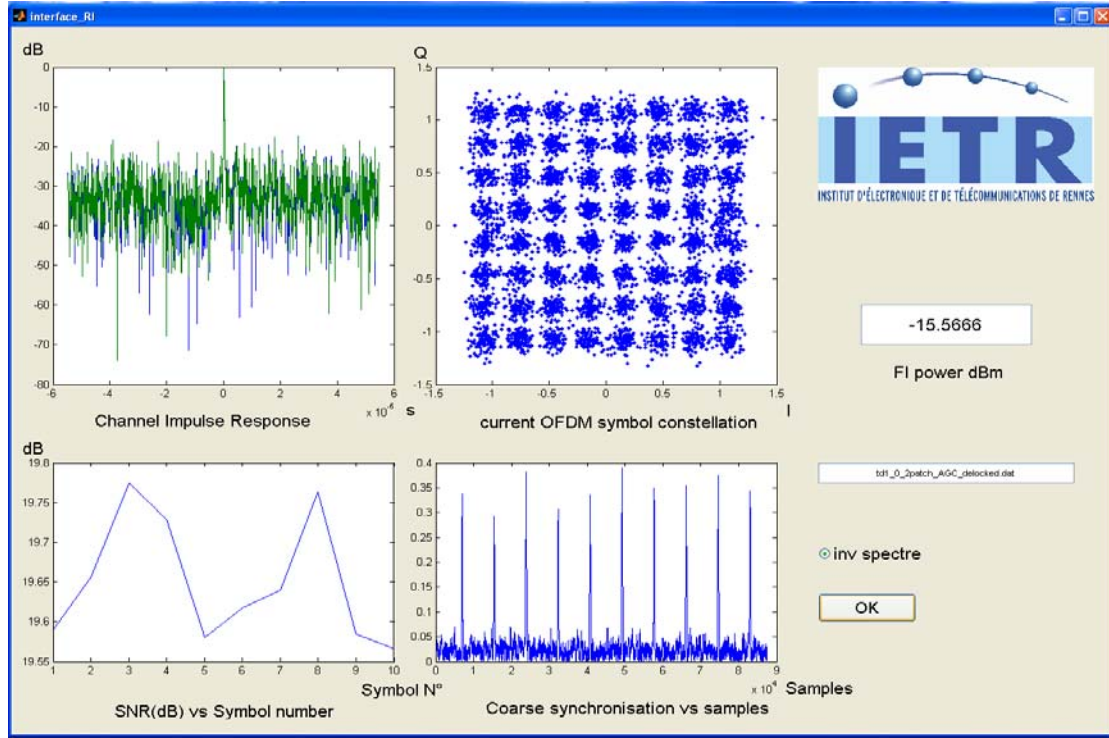


Figure 7 : Interface graphique utilisateur développée pour la gestion de la réception et de la démodulation DVB-T. L'estimation des directions d'arrivée est obtenue en maximisant le spectre de Capon donné par :

$$P_{capon}(Az, El) = \frac{1}{a(Az, El)^T \cdot R_{XX} \cdot a(Az, El)} \quad (3)$$

Avec Az , l'angle d'azimut, El , l'angle d'élévation et a , le vecteur source (Steering Vector en anglais) du réseau d'antennes.

3.3.2. Algorithme haute résolution MUSIC

Cet algorithme utilise une décomposition en éléments propres de la matrice de covariance R_{xx} donnée par l'équation (2). Le but est de séparer les échantillons en deux sous-espaces orthogonaux, le premier étant le sous-espace « bruit » et le deuxième, le sous-espace « signal ».

Après cette décomposition, le nombre de directions d'arrivée (nombre de sources) NSE est évalué en déterminant les valeurs propres les plus fortes. Un pseudo-spectre $PSSP$ est alors calculé par la formule (4) qui utilise le vecteur source normalisé $b(Az, El)$:

$$PSSP(Az) = \frac{1}{\sum_{k=NSE+1}^{NC} |v_k^T b(Az, El)|} \quad (4)$$

Avec NC , le nombre de capteurs (4 dans notre cas), k , le numéro du capteur, v_k^T , le vecteur propre et $b=a/(NC)^{1/2}$, le vecteur source normalisé.

Le maximum de ce pseudo-spectre suivant Az et El , donne les directions d'arrivée des trajets.

4. Description des campagnes de mesure

4.1. Introduction

Pour les mesures, le sondeur a été installé dans un véhicule. Les antennes sont placées dans un coffre de toit et un récepteur GPS est associé au sondeur afin d'établir une cartographie des trajets effectués. La figure 8 montre le système embarqué dans le véhicule. La figure 9 présente le référentiel angulaire en azimut et en élévation en fonction de l'orientation du véhicule.

Les mesures ont été réalisées dans quatre environnements différents :

- Trois en Bretagne à proximité de Rennes : voie express, zone rurale et centre ville de faible densité,
- Un dans le centre de Paris afin de caractériser le canal en zone urbaine très dense.



Figure 8 : Photo du système embarqué dans le véhicule.

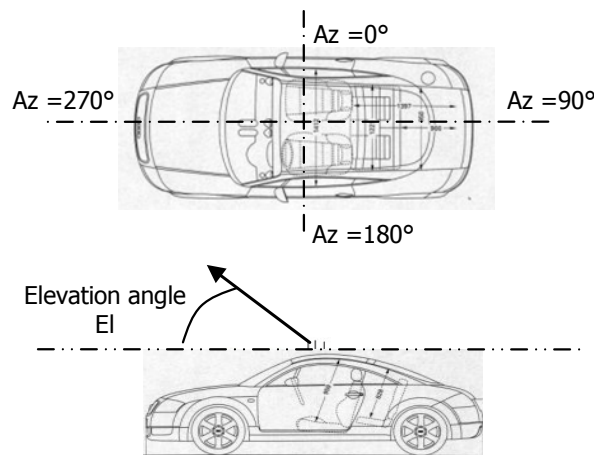


Figure 9 : Référentiel angulaire en azimut (Az) et en élévation (E) en fonction de l'orientation du véhicule.

5. Caractérisation du canal de propagation

5.1. Introduction

A partir des mesures réalisées lors de chaque campagne, plusieurs paramètres sont estimés en fonction du temps symbole :

- La réponse impulsionnelle,
- La fonction de transfert ou réponse fréquentielle,
- Les directions d'arrivée des ondes en fonction des angles d'azimut et d'élévation.

Les résultats des estimations des angles d'arrivée sont représentés sous la forme de graphes polaires constitués de 20 secteurs angulaires de 18° . L'amplitude de chaque secteur représente le pourcentage d'estimations de directions d'arrivée pour le secteur concerné. Ces graphes sont tracés en utilisant un grand nombre de symboles DVB-T, allant de 200 à 450 en fonction des mesures, ce qui représente une durée d'analyse de l'ordre d'une centaine de millisecondes. Les directions d'arrivée des ondes peuvent donc être considérées comme stables pendant la mesure.

Les résultats temporels sont présentés sous la forme de graphes donnant la variation de l'amplitude de la réponse impulsionnelle $h(\tau)$ en fonction du retard relatif et en fonction du temps symbole. Un exemple de réponse est présenté à la figure 10. On peut observer que le nombre de trajets est relativement réduit et qu'ils sont concentrés autour de trajets principaux. Cette représentation est différente d'un modèle de type TU-6 ou RA-6 et s'apparente plus à un modèle de type « Saleh - Valenzuela » [21,22].

Ce modèle proposé par Saleh et Valenzuela est un modèle statistique qui repose sur l'hypothèse que les multitrajets principaux arrivent en « clusters » formés par les réflexions multiples à proximité de l'émetteur et du récepteur. Les amplitudes de ces clusters sont des variables aléatoires indépendantes de Rayleigh et leurs phases sont indépendantes et uniformément réparties sur l'intervalle $[0, 2\pi]$. La décroissance de la puissance suit une loi exponentielle en fonction du retard de propagation. Un exemple de réponse impulsionnelle en utilisant le modèle de « Saleh - Valenzuela » est présenté à la figure 11.

La largeur temporelle du cluster est estimée à partir du maximum de l'amplitude du cluster sélectionné, normalisée à 0 dB et à 0 μs , et du retard pour lequel l'amplitude est diminuée de -20 dB (figure 11).

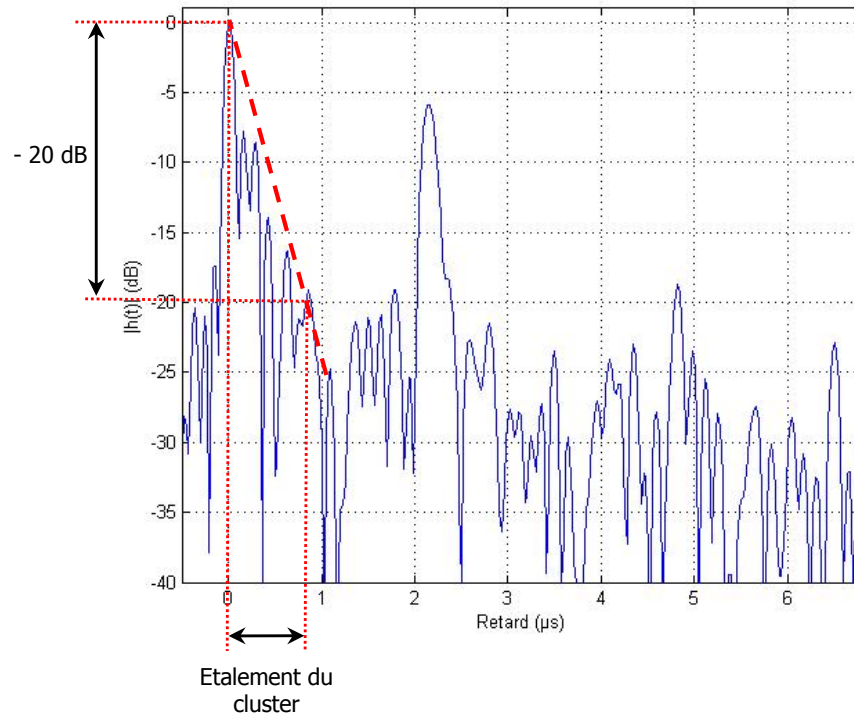


Figure 10 : Exemple de variation de l'amplitude de la réponse impulsionnelle mesurée en fonction du retard – Mesures effectuées sur Paris.

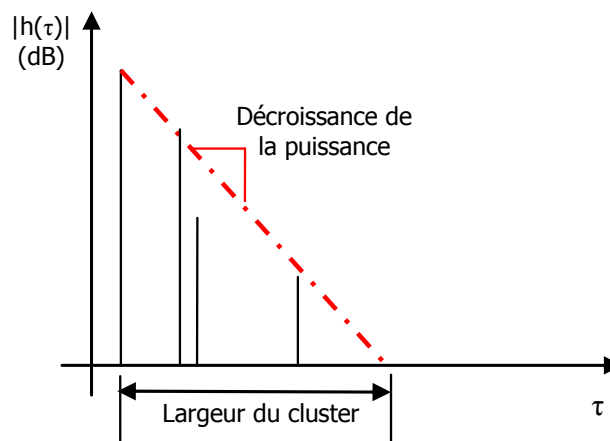


Figure 11 : Réponse impulsionnelle typique du modèle de Saleh – Valenzuela.

5.2. Résultats des campagnes de mesures effectuées en Bretagne

5.2.1. Introduction

Dans ce cas, le récepteur a été accordé pour recevoir les signaux issus de l'émetteur de télédiffusion de Rennes / Saint Pern (35). Trois trajets réalisés à proximité de Rennes ont été choisis de par leur diversité d'environnements et de vitesses :

- Un centre-ville de faible densité avec une vitesse limitée à 50 km/h.
- Une route rurale avec une vitesse limitée à 90 km/h.
- Une voie express avec une vitesse limitée à 110 km/h.

La figure 12 montre les routes enregistrées par le récepteur GPS, la position de l'émetteur ainsi que le sens de déplacement du véhicule.

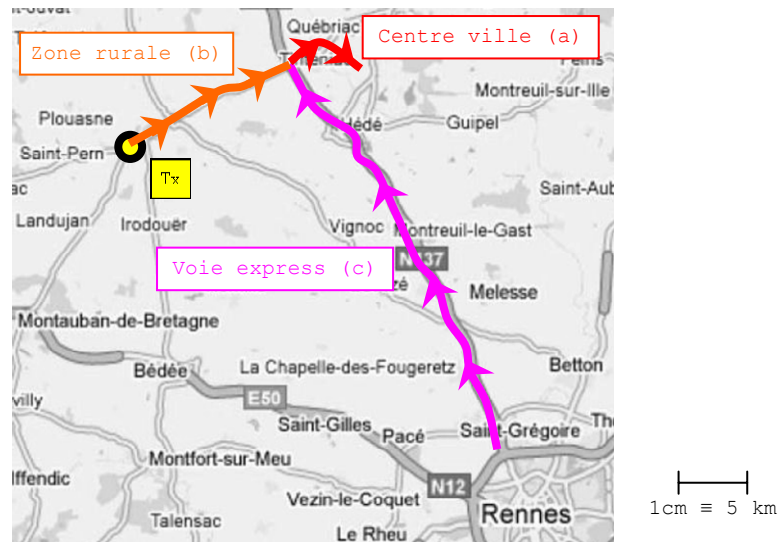


Figure 12 : Trajets parcourus lors des campagnes de mesures réalisées en Bretagne.

5.2.2. Trajet (a) : « Centre ville » à 50 km/h

Les figures suivantes présentent des exemples de réponses impulsionnelles mesurées sur les 4 voies de réception, pour un symbole donné (figure 13) et en fonction du temps symbole (figure 14). Durant la traversée du centre, les phénomènes de décrochage liés au masquage et la puissance du signal n'ont pas permis d'assurer une longue analyse. Les résultats présentés ici sont essentiellement des mesures effectuées à l'entrée dans le centre ville. On constate qu'un seul cluster est présent et que les différents trajets sont essentiellement concentrés autour du trajet principal.

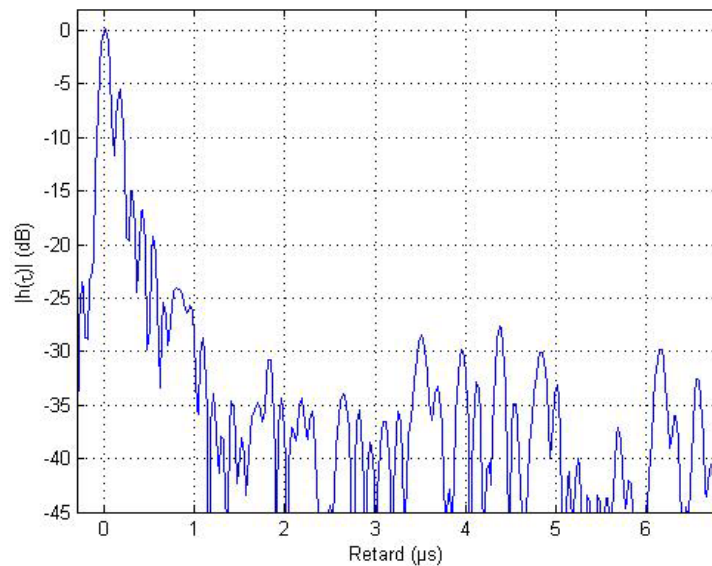


Figure 13 : Exemple de réponse impulsionnelle mesurée – Trajet « Centre ville ».

Les figures 15 et 16 présentent les résultats de goniométrie obtenus par la méthode de Capon et l'algorithme MUSIC. L'estimation conjointe de l'élévation et l'azimut (figure 15) ainsi la détermination du nombre d'occurrences des angles d'arrivée (figure 16) confirment la présence d'un seul cluster ayant un angle d'arrivée autour de 90° en azimut et de 10° en élévation. Le trajet principal est de type LoS.

Les traits rouges horizontaux sur la figure 14 sont des symboles perdus. Le manque de dynamique, un masquage ou une interférence (ponts, émetteurs GSM, etc...) peuvent en être à l'origine. On peut constater qu'ils n'interviennent pas aux mêmes instants sur chaque voie, ce qui confirme la possibilité de lutter contre les masquages et les interférences par la diversité du réseau lui-même.

Dans ce cas, la largeur moyenne du cluster ainsi que son écart-type sont les plus importants, respectivement de 0,626 μ s et 0,844 μ s (tableau 2). L'environnement, constitué d'immeubles et de maisons se trouvant en bordure de la route, apporte donc des multitrajets spéculaires de forte amplitude qui se traduisent par des retards relatifs plus importants par rapport au trajet principal. L'étalement du cluster est donc plus important que dans les cas précédents. La pente intra-cluster est dans ce cas relativement faible, de $-42,7$ dB/ μ s. De même, la diversité de l'implantation et du type des habitations apporte une importante variabilité temporelle de la réponse impulsionnelle qui se traduit par un écart-type moyen extrêmement important.

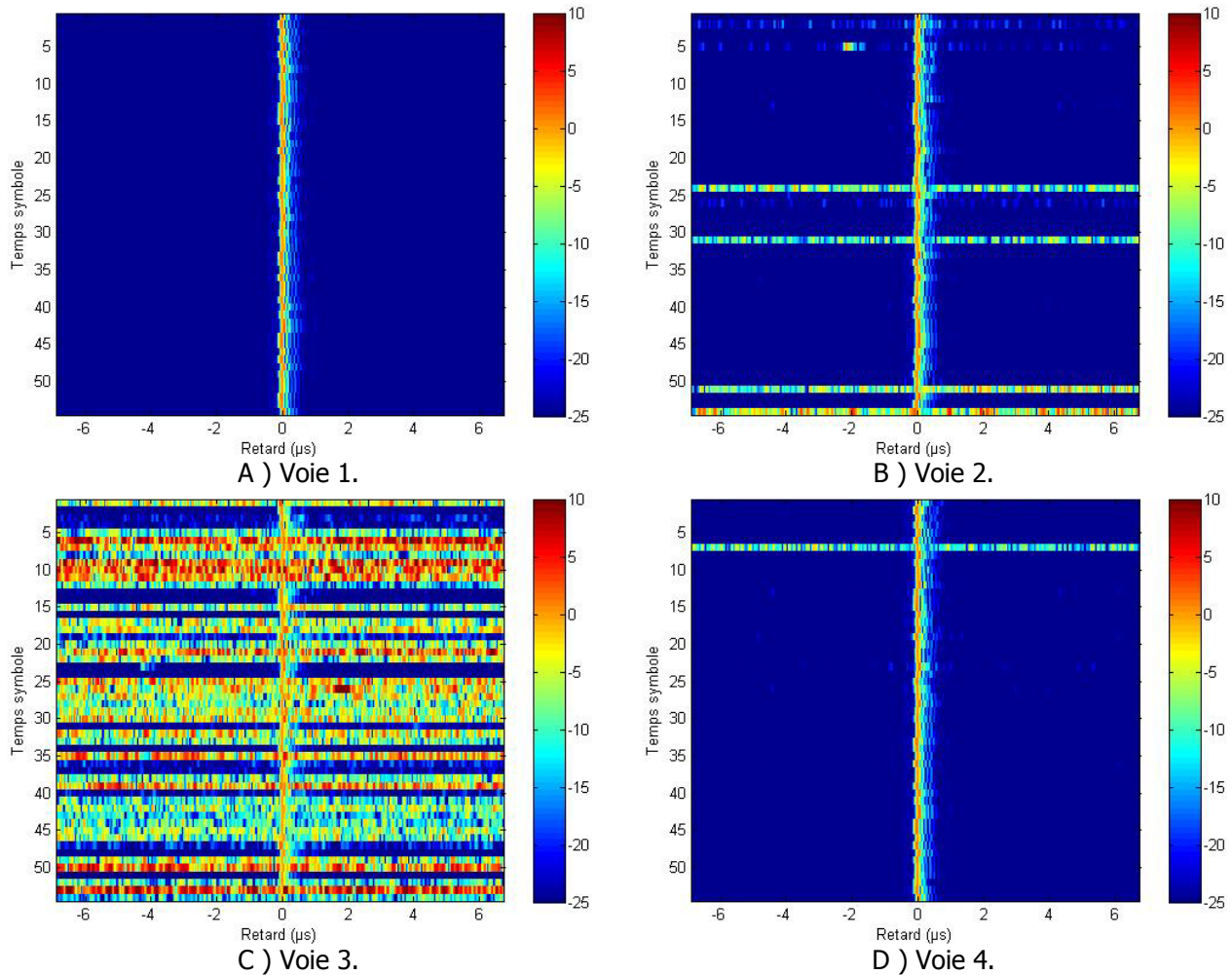


Figure 14 : Représentations temps - retard mesurées sur les 4 voies de réception et sur 53 symboles – Trajet « Centre ville ».

Largeur du cluster (μs)		Pente moyenne intra-cluster (dB/ μs)
\bar{m}	Σ	
0,626	0,844	- 42,7

Tableau 2 : Moyenne, écart type et pente moyenne intra-cluster du cluster principal – Trajet « Centre ville ».

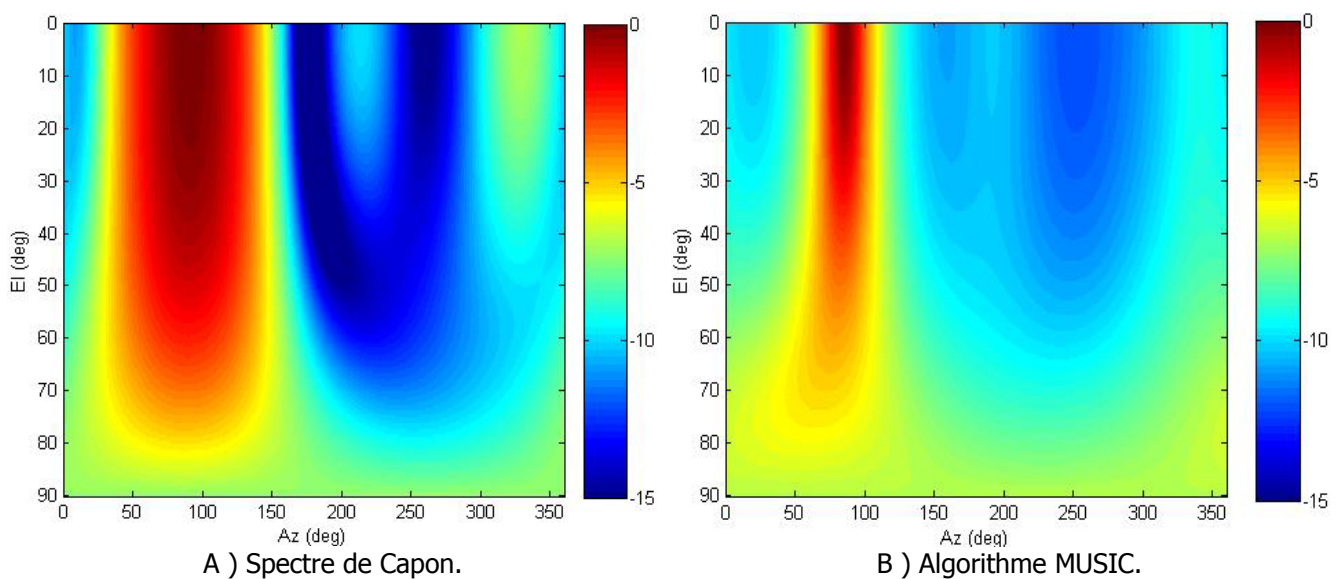
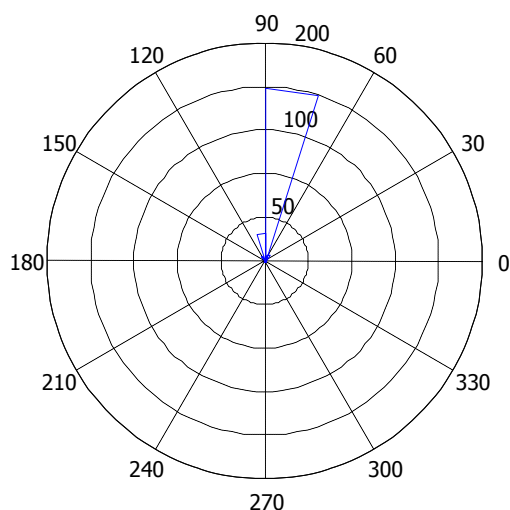
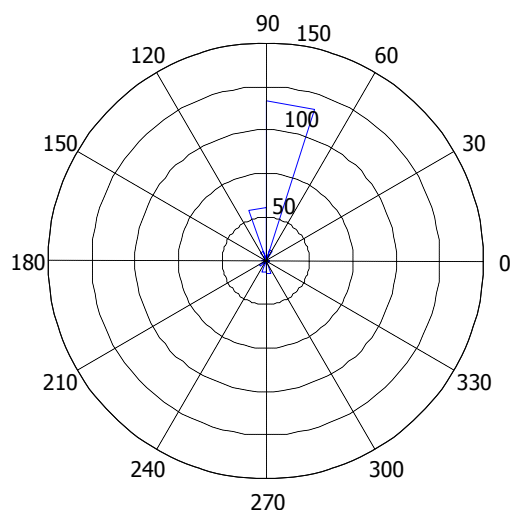


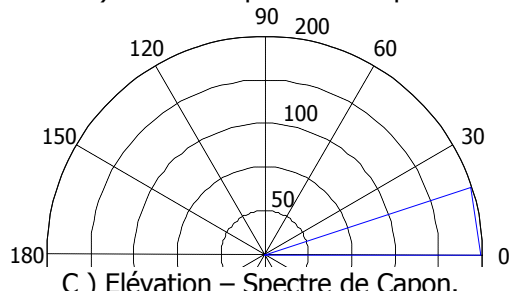
Figure 15 : Estimations conjointes des angles d'arrivée en azimut et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Trajet « Centre ville ».



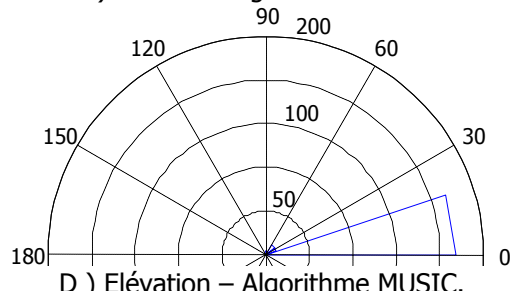
A) Azimut – Spectre de Capon.



B) Azimut – Algorithme MUSIC.



C) Elévation – Spectre de Capon.



D) Elévation – Algorithme MUSIC.

Figure 16 : Estimations des angles d'arrivée en azimut et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Trajet « Centre ville ».

5.2.3. Trajet (b) : « Zone rurale » à 90 km/h

Les réponses impulsionnelles présentées aux figures 17 et 18, ont été mesurées lors d'un déplacement en zone rurale, à la vitesse de 90 km/h. La représentation temps-retard montre ici deux clusters. Le principal a une largeur moyenne de $0,3 \mu\text{s}$ pour un écart-type moyen de $0,07 \mu\text{s}$ (tableau 3). Sa position autour du zéro est imposée par la méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle. On aperçoit un second cluster, avec un retard vis-à-vis du premier qui diminue avec le temps symbole. Le retard maximum entre ces deux clusters est de l'ordre de $2 \mu\text{s}$ au début de l'acquisition et évolue vers $1 \mu\text{s}$ environ à la fin des 53 symboles.

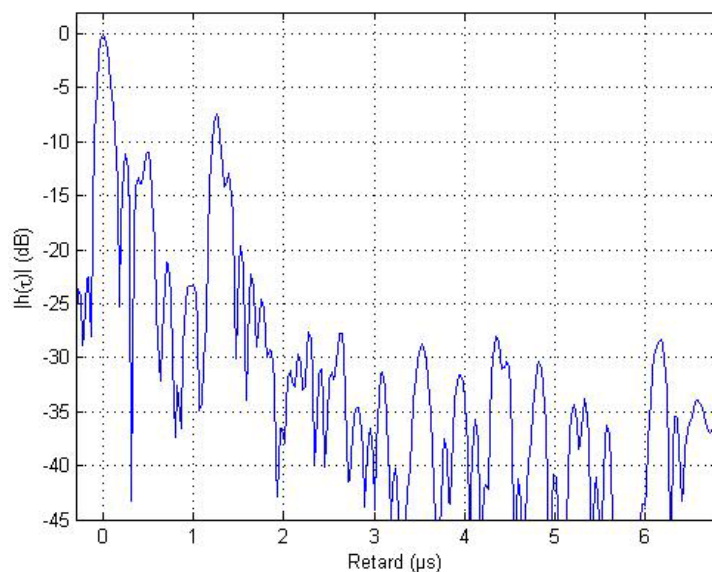


Figure 17 : Exemple de réponse impulsionnelle mesurée – Trajet « Zone rurale ».

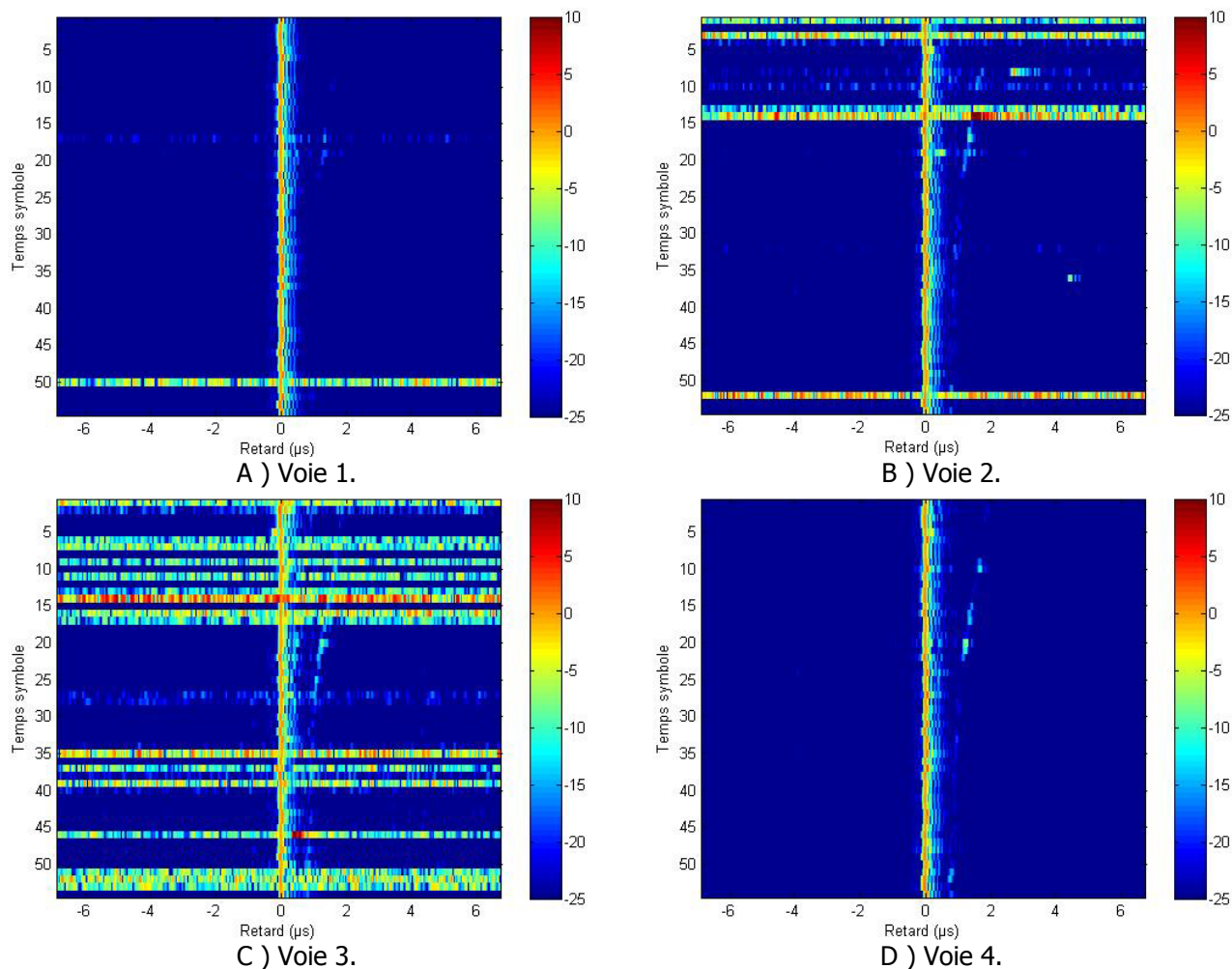


Figure 18 : Représentations temps - retard mesurées sur les 4 voies de réception et sur 53 symboles – Trajet « Zone rurale ».

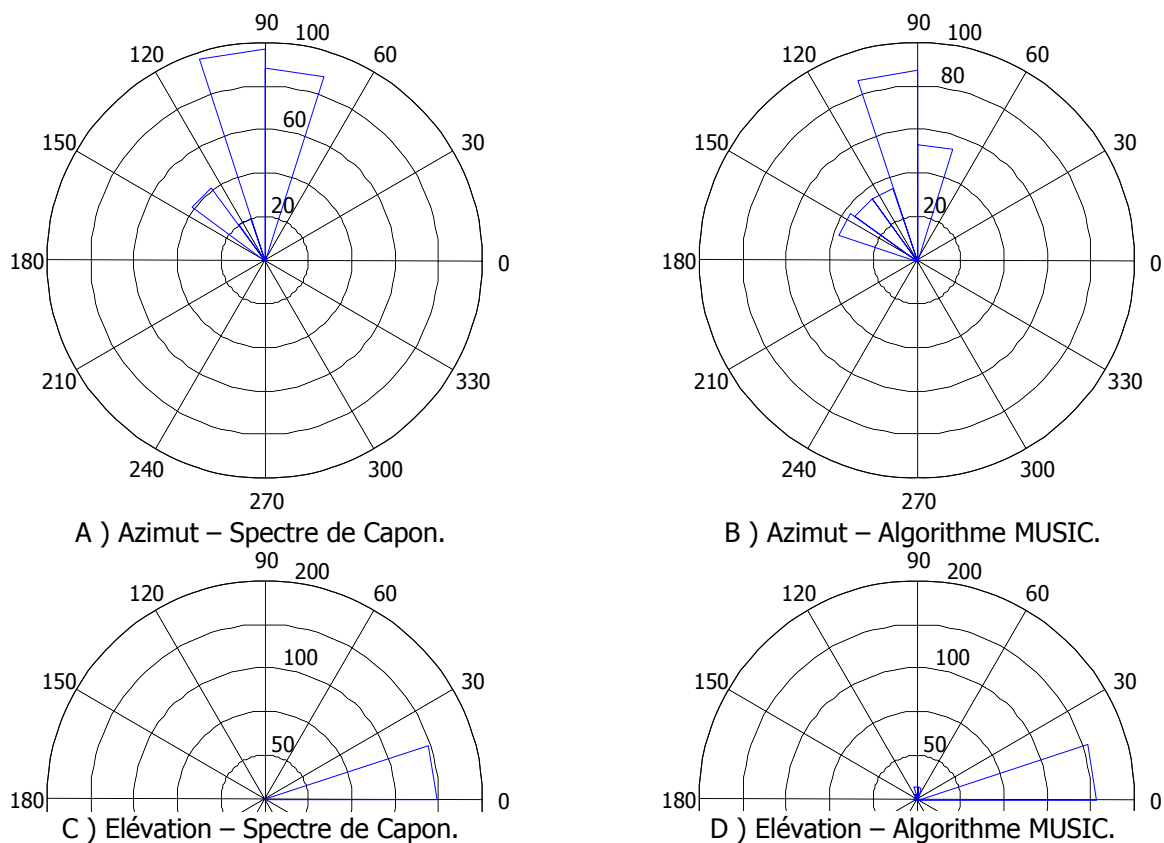


Figure 19 : Estimations des angles d'arrivée en azimut et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Trajet « Zone rurale ».

Largeur du cluster (μs)		Pente moyenne intra-cluster (dB/ μs)
\bar{m}	Σ	
0,3	0,07	- 50

Tableau 3 : Moyenne, écart type et pente moyenne intra-cluster du cluster principal – Trajet « Zone rurale ».

La proximité de l'émetteur permet d'avoir un rapport signal à bruit suffisant pour apercevoir ces deux trajets de puissance élevée. Dans les cas qui suivront, il sera quelquefois difficile de faire ressortir d'autres trajets que le principal. La figure 19 donne la distribution angulaire des angles d'arrivée. Cette estimation montre également une configuration de type LoS. L'angle décrit par le véhicule et l'émetteur est l'angle d'arrivée de l'onde incidente principale. L'angle d'arrivée est en moyenne de 90° en azimut et autour de 10° en élévation. Les deux trajets semblent provenir de la même direction moyenne d'arrivée.

On constate que dans cette configuration, la largeur moyenne du cluster est plus faible que précédemment car les trajets secondaires à proximité du trajet dominant sont certainement liés à des diffuseurs. L'atténuation décroît donc rapidement, d'où une pente moyenne intra-cluster plus importante (- 50 dB/ μs). Les autres trajets de propagation présents sont probablement d'origine spéculaire et ont des retards de propagation plus importants induisant l'existence de nouveaux clusters.

5.2.4. Trajet (c) : « Voie express » à 110 km/h

Dans le cas présent, les réponses impulsionnelles présentées aux figures 20 et 21, ont été mesurées lors d'un trajet sur une voie express à la vitesse de 110 km/h.

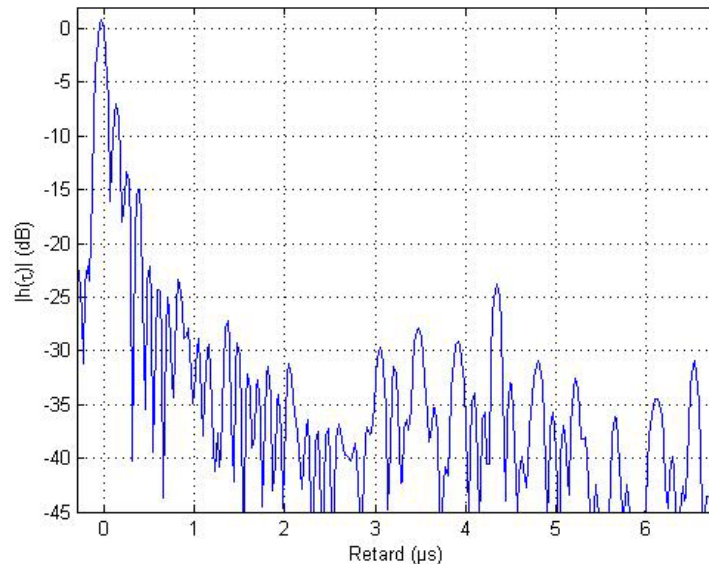


Figure 20 : Exemple de réponse impulsionnelle mesurée – Trajet « Voie express ».

Dans le cas présent, il n'y a qu'un seul cluster d'une largeur moyenne d'environ $0,4 \mu\text{s}$ et d'écart-type $0,04 \mu\text{s}$ (tableau 4). Ceci implique que les trajets sont essentiellement concentrés autour du trajet principal. Il existe des phénomènes d'évanouissements, mais avec des temps de groupes différentiels faibles et non-discriminables par le système.

Dans cet environnement, les obstacles peuvent être nombreux et particulièrement mobiles. Ils font naître des réflexions passagères très rapides ayant des retards de groupe relatifs très faibles, contenus dans la résolution temporelle du sondeur. Le canal peut donc être considéré comme stable, ce qui se traduit par une faible valeur de l'écart-type de la mesure. La pente moyenne du cluster est dans ce cas, d'environ - 43 dB/ μs .

Largeur du cluster (μs)		Pente moyenne intra-cluster (dB/ μs)
\bar{m}	Σ	
0,443	0,042	- 42,9

Tableau 4 : Moyenne, écart type et pente moyenne intra-cluster du cluster principal – Trajet « Voie express ».

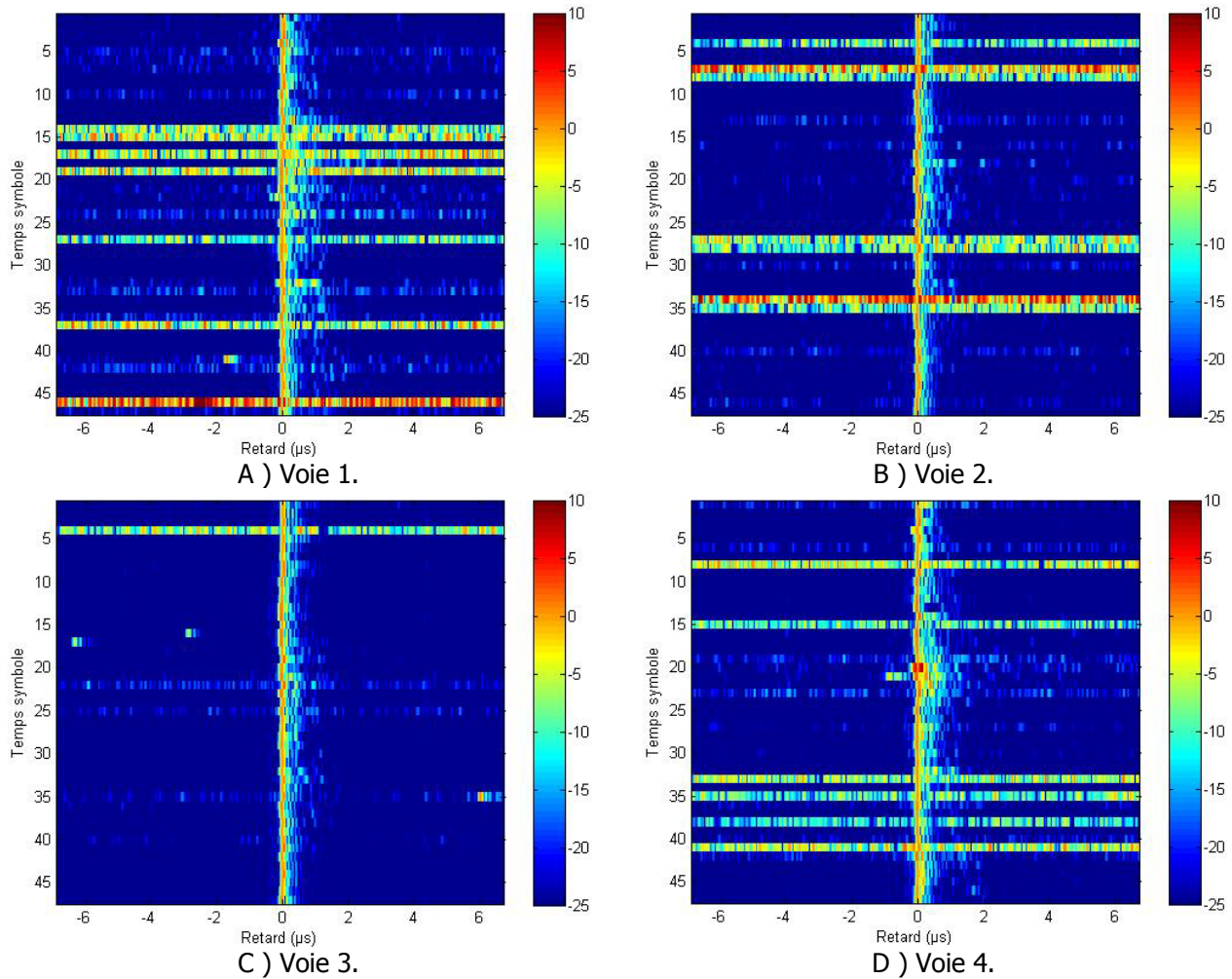


Figure 21 : Représentations temps - retard mesurées sur les 4 voies de réception et sur 47 symboles – Trajet « Voie express ».

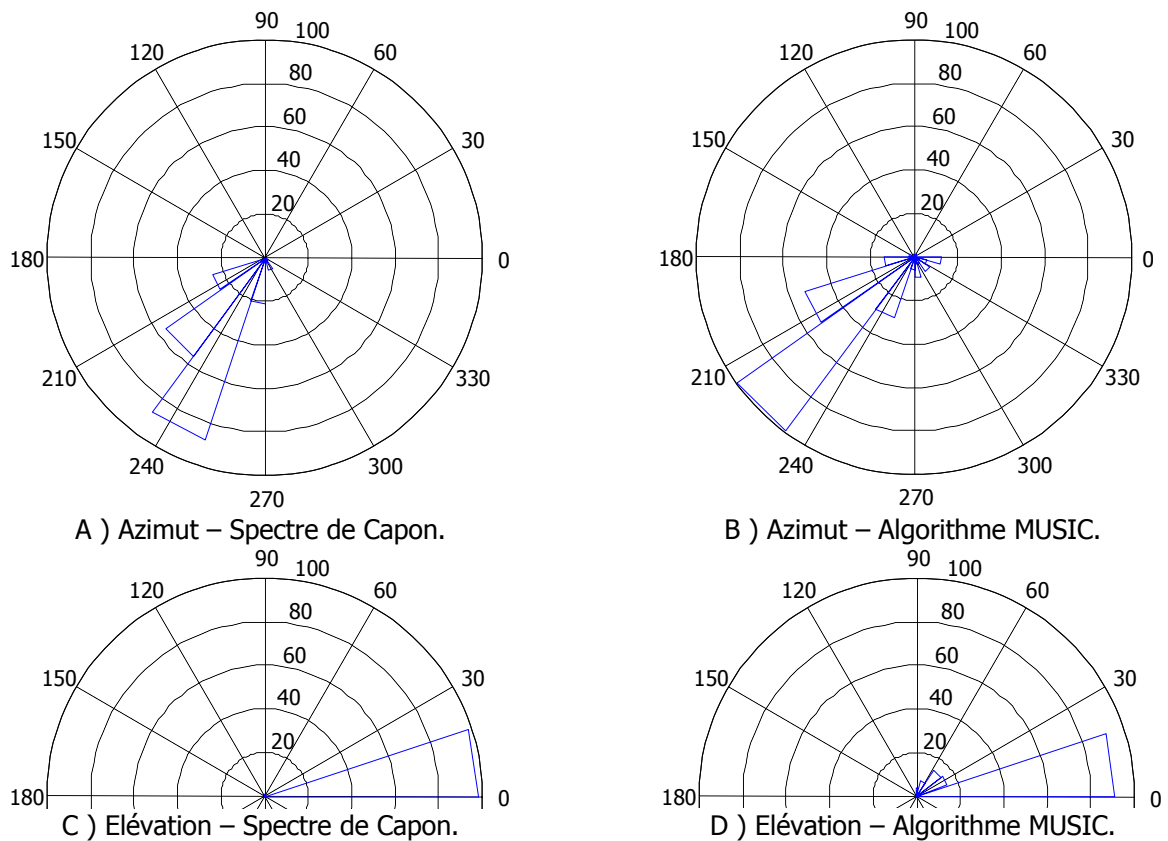


Figure 22 : Estimations des angles d'arrivée en azimut et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Trajet « Voie express ».

La figure 22 donne la distribution angulaire des angles d'arrivée par les deux méthodes, MUSIC et spectre de Capon. Un seul secteur angulaire est prédominant, ce qui confirme les résultats obtenus sur la représentation temps-retard. La configuration est de type LoS (Line of Sight), les angles d'arrivées étant cohérents avec l'angle décrit entre l'émetteur et le récepteur mobile, c'est-à-dire entre 220° et 240° en azimut, et entre 10° et 15° en élévation.

5.2.5. Conclusion sur les campagnes de mesures effectuées en Bretagne

Les multitrajets sont discriminables à proximité de l'émetteur, mais ils se confondent en un seul cluster dès que la distance augmente. On peut donc considérer que proche d'un émetteur, la configuration est de type réseau cellulaire à petite cellule, comme il peut en exister sur des répéteurs ou émetteurs de centre ville. La distribution angulaire quant à elle, est essentiellement concentrée autour de l'angle principal, dans un secteur de 10° à 15°. Dans les autres cas, la démodulation n'est souvent pas possible. Le récepteur est trop souvent masqué par les bâtiments du centre ville et les diffractions n'assurent pas un rapport signal sur bruit suffisant pour traiter le signal.

Les clusters, quant à eux, se maintiennent dans une largeur inférieure à 0,7 μ s avec une moyenne de l'ordre de 0,5 μ s. L'étalement maximum est mesuré en ville du fait de l'existence de multitrajets spéculaires, avec une variabilité importante liée à l'hétérogénéité de l'environnement. Ce phénomène s'observe dans une moindre mesure, lors de déplacements sur des voies express où le canal varie rapidement mais possède des trajets de propagation ayant des amplitudes et des retards relatifs moins élevés liés à la trajectoire linéaire et à un environnement continuement dégagé. Dans le cas d'une réception en zone rurale, l'étalement des retards est le plus faible car les multitrajets sont liés à des diffusions autour du trajet principal. Ces deux types d'environnements sont donc relativement stables ce qui explique la faible valeur de l'écart-type. Lorsqu'un second cluster est détecté, son retard relatif maximum est de 2 μ s. L'intervalle de garde est donc suffisant ici pour récupérer les multitrajets sans interférence entre symboles.

5.3. Résultats des campagnes de mesures effectuées à Paris

5.3.1. Introduction

Dans ce cas, le récepteur a été accordé pour recevoir les signaux issus de l'émetteur de télédiffusion de la Tour Eiffel. Deux trajets ont été effectués sur chaque rive de la Seine où la vitesse est limitée à 50 km/h. La figure 23 montre les routes enregistrées par le récepteur GPS, la position de l'émetteur ainsi que le sens de déplacement du véhicule.

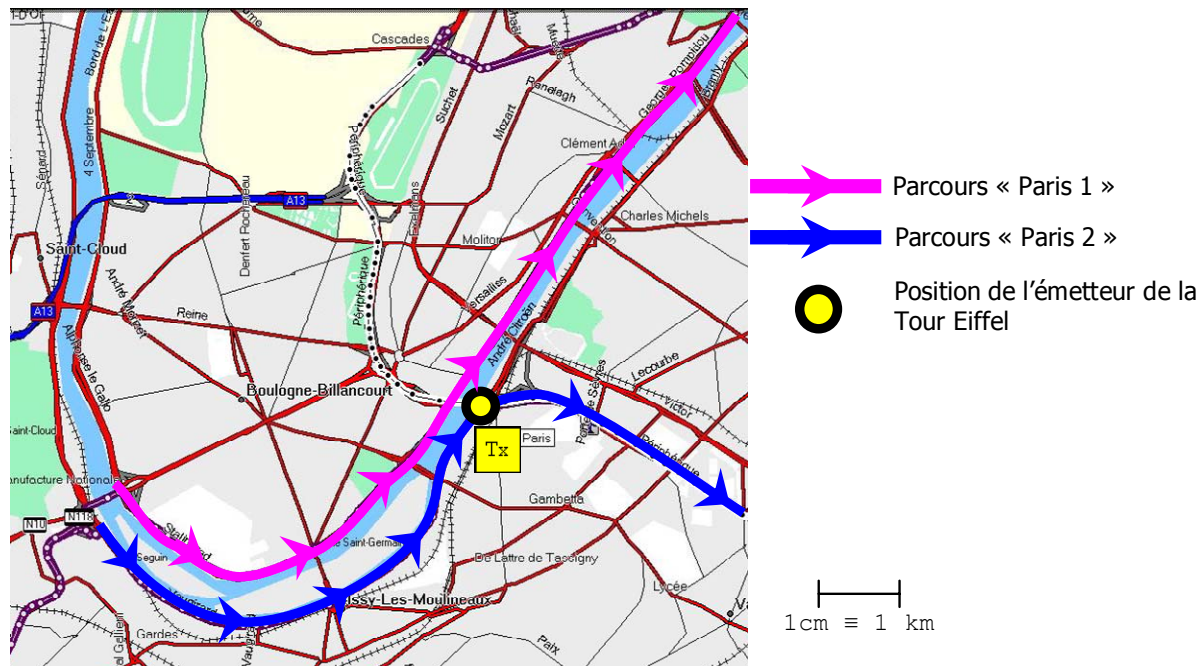


Figure 23 : Trajets parcourus lors des campagnes de mesures effectuées sur Paris.

5.3.2. Trajet « Paris 1 »

Les réponses impulsionnelles présentées aux figures 24 et 25 ont été mesurées sur la rive droite de la Seine, dans Paris intra-muros. Du fait de la proximité de l'émetteur de la Tour Eiffel, des phénomènes de saturation des récepteurs sont observés, notamment sur les voies 2 et 4.

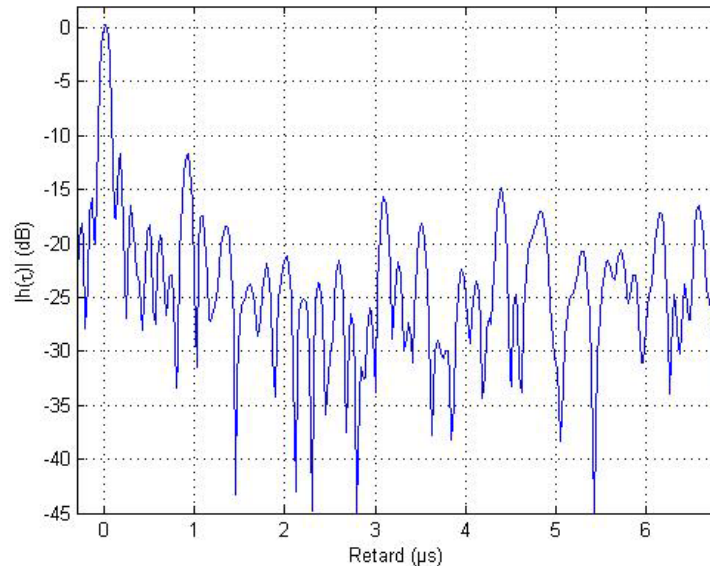


Figure 24 : Exemple de réponse impulsionnelle mesurée – Trajet « Paris 1 ».

Dans le cas présent, le premier cluster est contenu dans environ $0,4 \mu\text{s}$ avec une pente intra-cluster de $-32,1 \text{ dB}/\mu\text{s}$ (tableau 5). Autour de ce dernier, un ensemble de trajets se détache dans un étalement en retard variant de 0 à $3 \mu\text{s}$. La dynamique du récepteur ne nous permet pas de suivre très longtemps les multitrajets. Le nombre de trajets discriminables à un instant symbole donné est au maximum de trois. Il faut malgré tout retenir que les trajets qui n'apparaissent pas, sont inférieurs de 20 à 25 dB par rapport au premier trajet référencé à 0 dB. Cela sous-entend qu'en termes de qualité de réception, leurs effets seront donc modérés.

Largeur du cluster (μs)		Pente moyenne intra-cluster ($\text{dB}/\mu\text{s}$)
\bar{m}	Σ	
0,415	0,075	- 32,1

Tableau 5 : Moyenne, écart type et pente moyenne intra-cluster du cluster principal – Trajet « Paris 1 ».

Les estimations angulaires de la figure 26 présentent les analyses goniométriques effectuées sur le premier des clusters. L'azimut est dans un secteur compris entre 60° et 120° avec une forte concentration vers 80° , pour une élévation de l'ordre de 10° .

Les estimations angulaires de la figure 27 montrent l'analyse goniométrique réalisée sur le deuxième cluster. On remarque une différence entre le spectre de Capon et MUSIC même si les angles moyens sont concentrés, pour l'azimut, entre 220° et 300° . Pour l'élévation, l'angle d'arrivée est essentiellement compris autour de 10° , mais l'algorithme MUSIC détecte quelques angles d'élévation autour de 60° .

Comme précédemment dans les cas « Voie express » et « Centre ville », l'étalement du cluster principal est relativement important, lié à la densité des habitations qui apporte de nombreux trajets avec des retards relatifs de propagation faibles.

L'estimation de l'angle différentiel est intéressante afin d'estimer la stabilité du canal en fonction du temps. La stratégie algorithmique des traitements en diversité peut ainsi en être impactée.

On constate que l'angle différentiel estimé par les deux méthodes varie de manière similaire (figure 28). L'estimation réalisée par l'algorithme MUSIC est plus perturbée que celle effectuée par le spectre de Capon. Lors de la décomposition des signaux dans les sous-espaces orthogonaux « signal » et « bruit », l'algorithme MUSIC fait l'hypothèse que le bruit est blanc, gaussien et omnidirectionnel. L'invalidation de cette hypothèse apporte des biais d'estimation qui peuvent justifier les variations importantes observées autour de la valeur moyenne.

Dans notre cas, la limitation de l'angle différentiel dans un secteur angulaire allant de 130° à 230° , permet de faire l'hypothèse de « canyon » urbain. Dès lors, la possibilité de disposer des antennes sectorisées sur le véhicule et d'utiliser des algorithmes de sélection d'antennes, pour améliorer la réception, serait une hypothèse de travail intéressante.

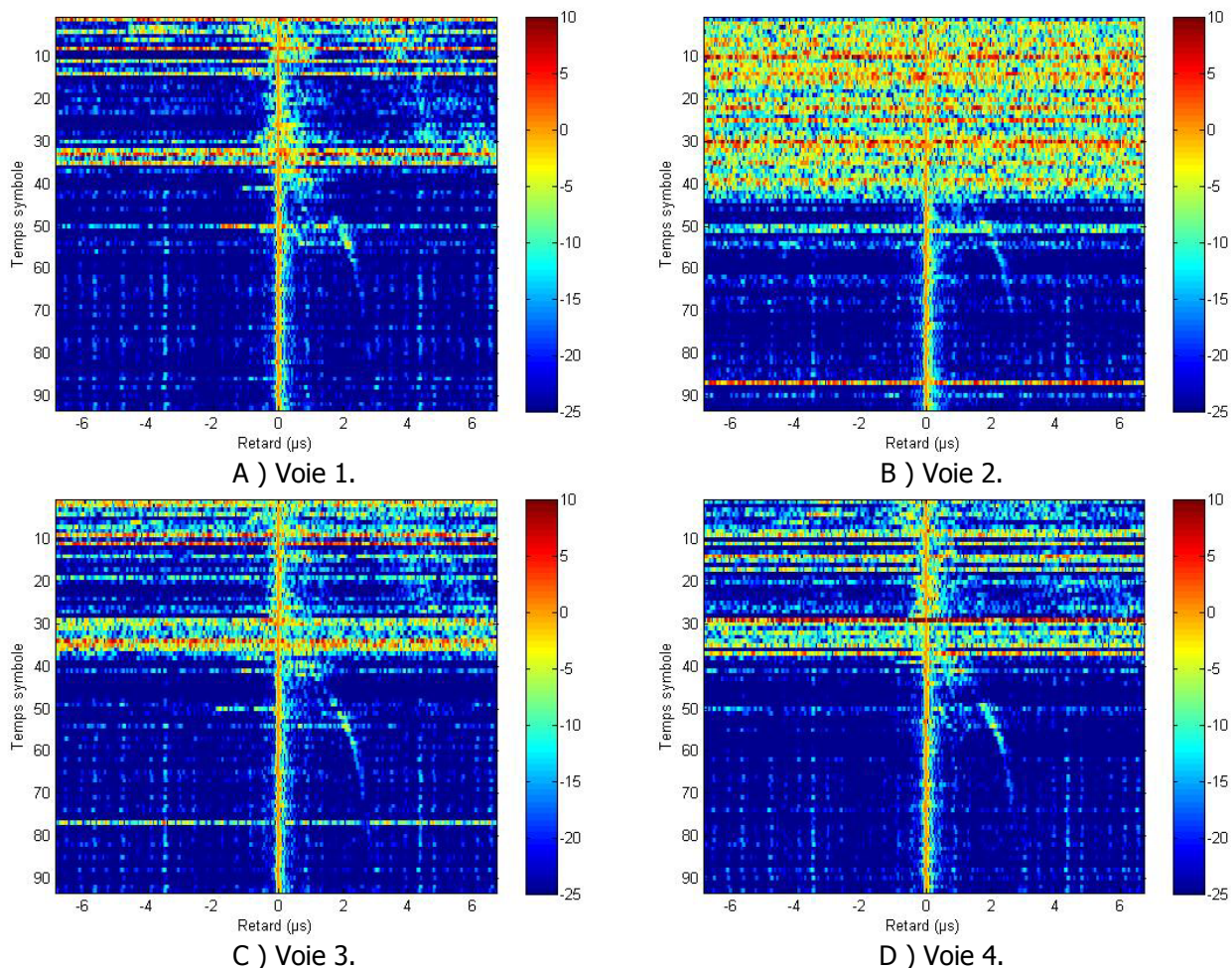


Figure 25 : Représentations temps - retard mesurées sur les 4 voies de réception et sur 92 symboles – Trajet « Paris 1 ».

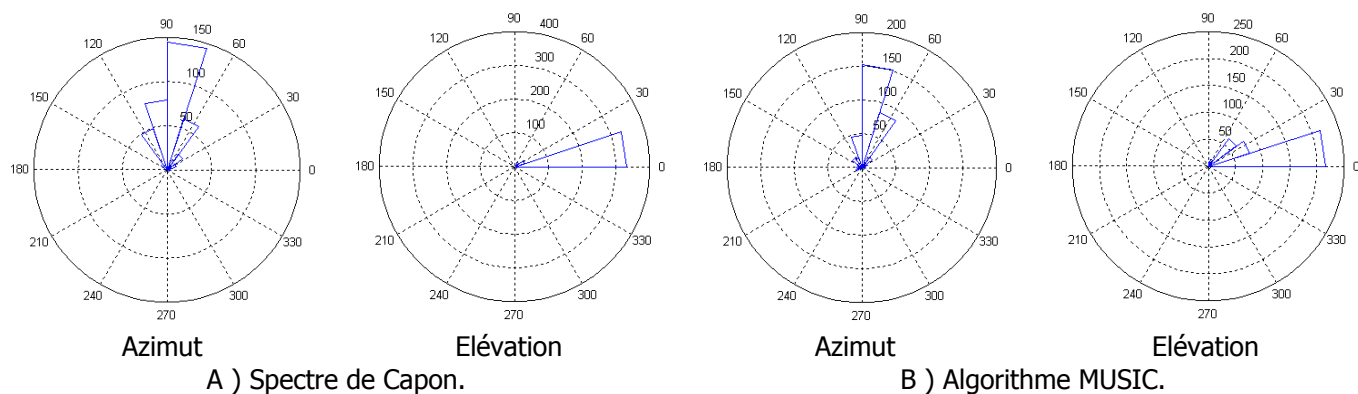


Figure 26 : Estimations des angles d'arrivée en azimuth et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Cluster 1 – Trajet « Paris 1 ».

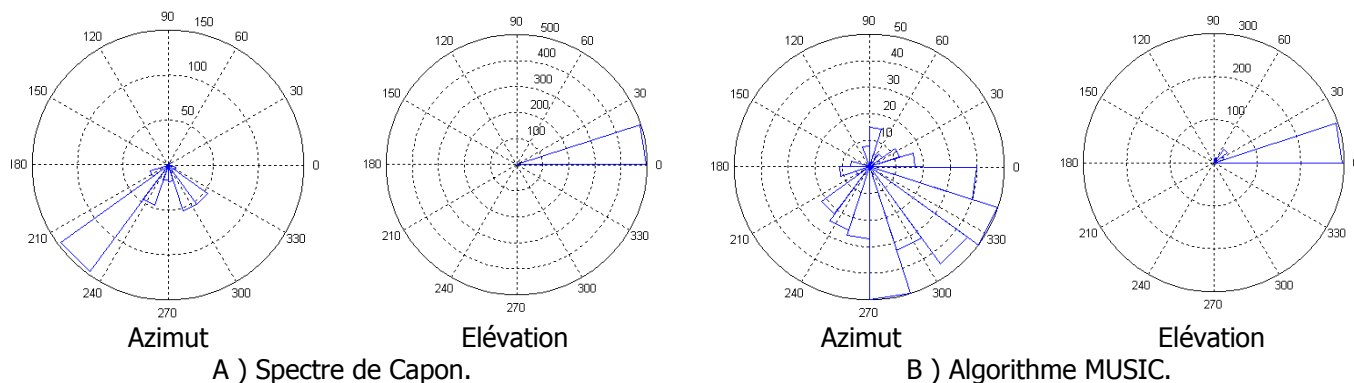
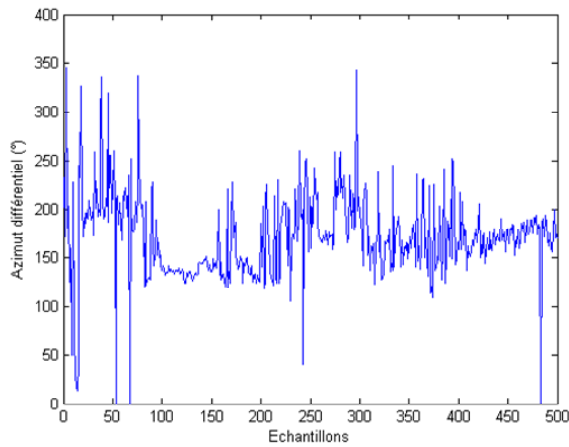
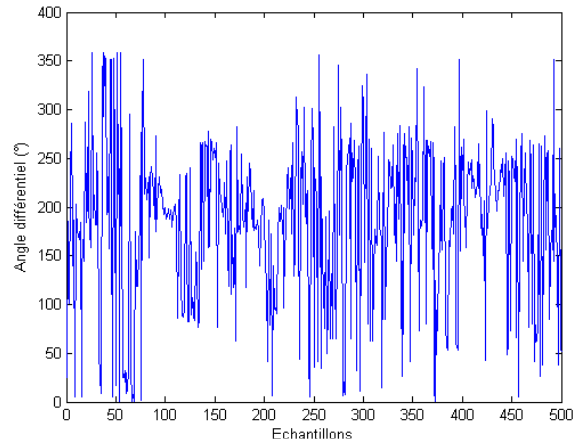


Figure 27 : Estimations des angles d'arrivée en azimuth et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Cluster 2 – Trajet « Paris 1 ».



A) Spectre de Capon.



B) Algorithme MUSIC.

Figure 28 : Estimation de l'angle différentiel en azimuth entre les clusters 1 et 2 – Trajet « Paris 1 ».

5.3.3. Trajet « Paris 2 »

Dans le cas des mesures effectuées à Paris sur la rive gauche de la Seine, la visibilité du récepteur vis-à-vis de l'émetteur de la tour Eiffel est plus importante. Les figures 29 et 30 présentent des exemples de réponses impulsionnelles mesurées en fonction du temps sur les 4 voies de réception.

Deux clusters sont observés. Le principal a un étalement temporel très important de l'ordre de $0,6 \mu\text{s}$ (tableau 6). Le second est d'amplitude plus faible et décalé d'environ 1 à $1,8 \mu\text{s}$. La configuration en LoS de l'émetteur fait prédominer un trajet sur les graphes temps-retard. Des phénomènes similaires à ceux constatés en centre ville lors de la première campagne de mesure, sont observés. L'encaissement de la chaussée sur cette rive apporte des trajets spéculaires de forte amplitude, provoquant ainsi un étalement important du cluster. La pente intra-cluster est relativement faible, de $-37 \text{ dB}/\mu\text{s}$.

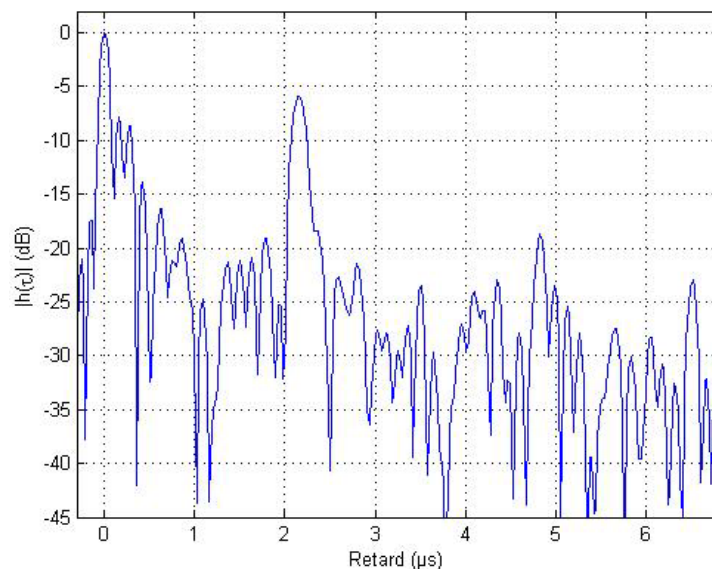
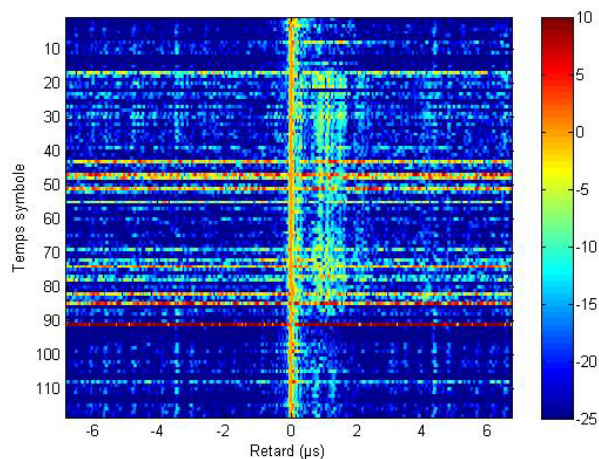


Figure 29 : Exemple de réponse impulsionnelle mesurée – Trajet « Centre ville ».

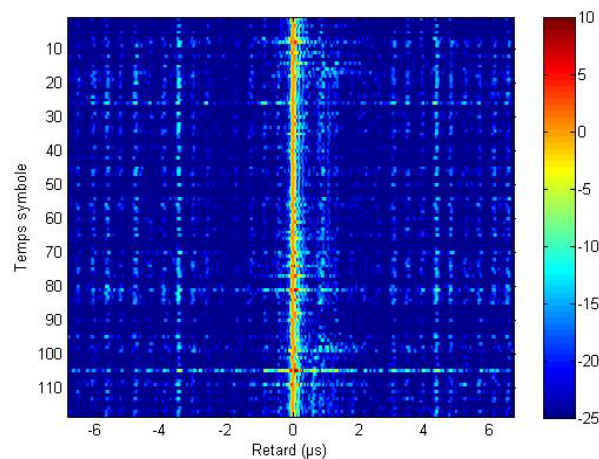
Largeur du cluster (μs)		Pente moyenne intra-cluster ($\text{dB}/\mu\text{s}$)
\bar{m}	Σ	
0,622	0,340	- 37

Tableau 6 : Moyenne, écart type et pente moyenne intra-cluster du cluster principal – Trajet « Paris 2 ».

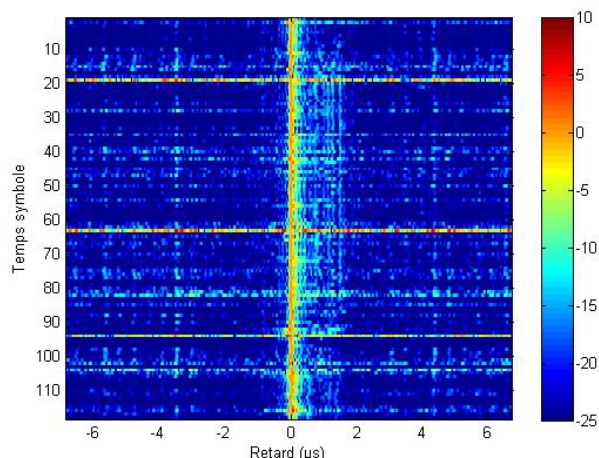
Les estimations angulaires de la figure 31 montrent les résultats de l'analyse goniométrique effectuée sur le premier cluster. On remarque une différence entre le spectre de Capon et l'algorithme MUSIC même si pour les deux techniques, les angles moyens en azimuth sont concentrés autour de 30° et de 120° . Pour l'élévation, les angles sont diffusés sur un secteur angulaire plus important que dans les cas précédents, jusqu'à 60° , du fait de la proximité de l'émetteur et de possibles phénomènes de diffraction liés à l'urbanisme.



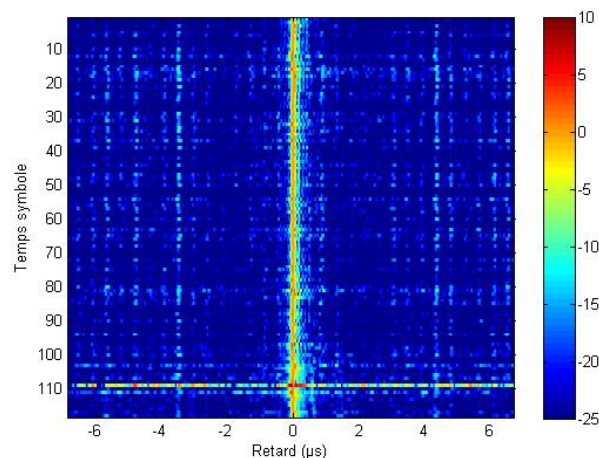
A) Voie 1.



B) Voie 2.

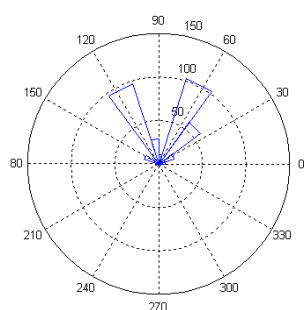


C) Voie 3.



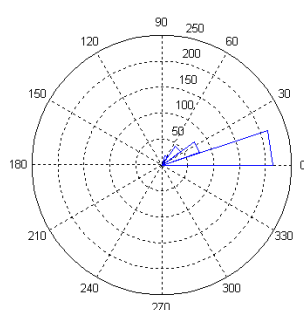
D) Voie 4.

Figure 30 : Représentations temps - retard mesurées sur les 4 voies de réception et sur 92 symboles – Trajet « Paris 2 ».

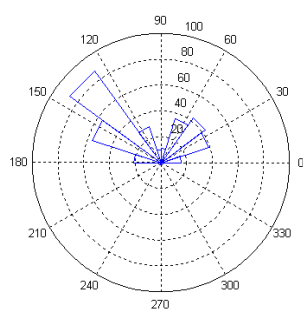


Azimut

A) Spectre de Capon.

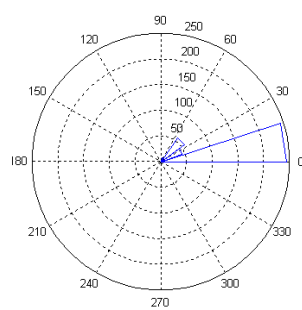


Elévation



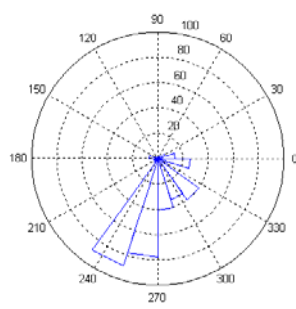
Azimut

B) Algorithme MUSIC.



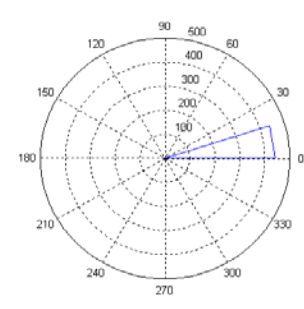
Elévation

Figure 31 : Estimations des angles d'arrivée en azimuth et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Cluster 1 – Trajet « Paris 2 ».

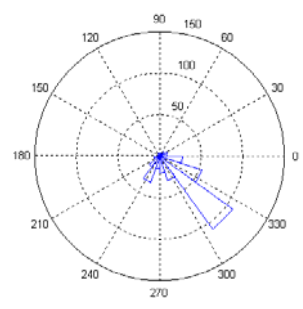


Azimut

A) Spectre de Capon.

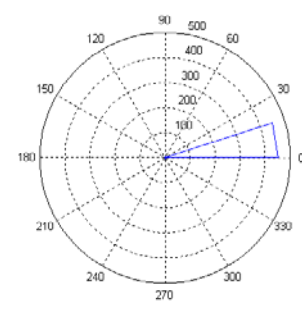


Elévation



Azimut

B) Algorithme MUSIC.



Elévation

Figure 32 : Estimations des angles d'arrivée en azimuth et en élévation avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC – Cluster 2 – Trajet « Paris 2 ».

Les résultats de l'analyse goniométrique sur le deuxième trajet sont présentés à la figure 32. On remarque une différence entre les résultats obtenus avec la méthode du spectre de Capon et l'algorithme MUSIC, liée vraisemblablement à des défauts d'orthogonalité entre les sous-espaces « bruit » et « signal » estimés par l'algorithme MUSIC. Les angles moyens sont concentrés, pour l'azimut, entre 240° et 320°. Pour l'élévation, les angles d'arrivée sont essentiellement concentrés autour de 10°.

La figure 33 présente la variation de l'angle différentiel entre les deux clusters. La variation est similaire pour les deux techniques de goniométrie. On constate une stabilité de cet écart différentiel qui confirme le phénomène de « canyon » urbain, les angles d'arrivée étant diamétralement opposés.

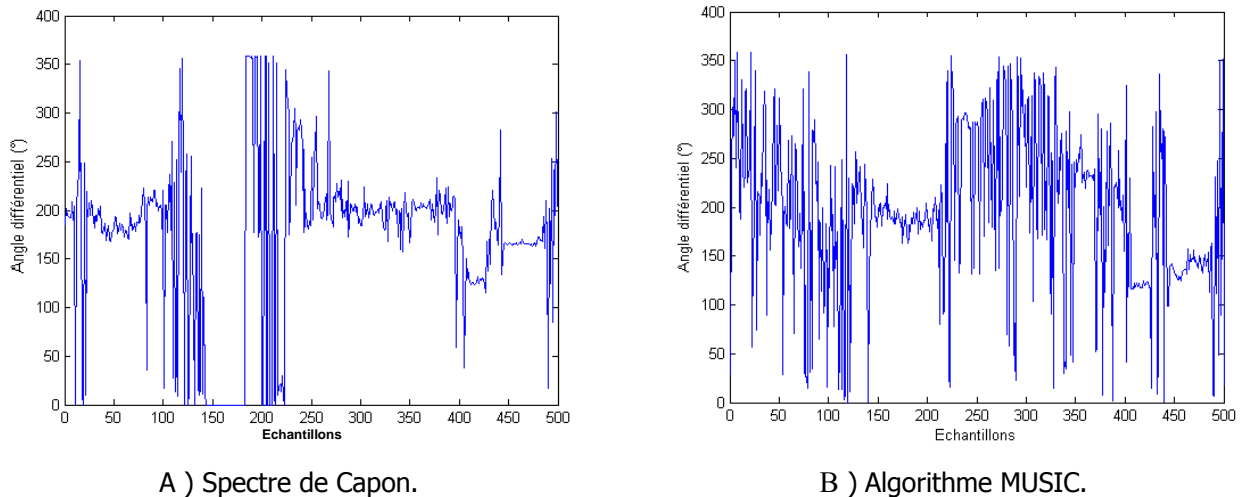


Figure 33 : Estimation de l'angle différentiel en azimut entre les clusters 1 et 2 – Trajet « Paris 1 ».

5.3.4. Conclusion sur les campagnes de mesures effectuées à Paris

Pour ces mesures en zone urbaine très dense, deux voire trois clusters sont observés. Comme dans les cas « Voie express » et « Centre ville » précédents, l'étalement du cluster principal est plus important qu'en zone rurale, du fait de la densité des habitations qui apporte de nombreux trajets spéculaires avec des retards relatifs de propagation proches du trajet principal. La largeur moyenne des clusters est de l'ordre de 0,5 μ s avec, par contre, dans le cas de la rive gauche (Trajet « Paris 1 »), une forte variabilité de l'environnement puisque l'écart-type est élevé. La forte densité des véhicules présents lors de la mesure peut expliquer ces importantes variations du canal. En rive droite, ces variations sont moins fortes. L'environnement est plus stable et répétitif, la densité des véhicules étant comparativement, à l'heure de passage, moins élevée.

L'analyse goniométrique estime généralement des directions d'arrivée différentes d'une configuration de type LoS. Une diffusion importante est observée à la fois en azimut et en élévation, traduisant des phénomènes de propagation par réflexion et/ou diffraction.

La stabilité de l'angle différentiel entre les deux trajets principaux, confirme l'existence de « canyons » urbains. Dès lors, la possibilité de disposer des antennes sectorisées sur le véhicule et d'utiliser des algorithmes de sélection d'antennes est envisageable dans un environnement urbain très dense.

L'écart angulaire entre ces deux angles en azimut, sur la mesure rive droite, est d'environ de 150 degrés. L'angle différentiel sur la mesure rive gauche est d'environ 200 degrés. Cela donne une information intéressante en ce qui concerne la diversité angulaire du canal.

6. Conclusion

Afin de caractériser le milieu de propagation en mobilité, un sondeur de canal passif multi-antennes a été développé. Ce système utilise les émissions standard DVB-T. Le traitement du signal utilisé reprend le principe d'un récepteur DVB-T pour estimer les paramètres caractéristiques du canal (réponses impulsionnelles, fonctions de transfert). Les directions d'arrivée des ondes sont ensuite estimées à partir des réponses impulsionnelles par deux méthodes, le spectre de Capon et l'algorithme MUSIC.

Des campagnes de mesure ont été effectuées dans quatre zones différentes représentatives :

- Zone rurale,
- Voie express,
- Zone urbaine,
- Zone urbaine très dense.

Les modèles habituellement préconisés pour la réception de la DVB-T en mobilité, sont le TU-6 en zone urbaine et le RA-6 en zone rurale [9]. Dans le cas du modèle TU-6, 6 trajets de propagation affectés par des évanouissements de type « Rayleigh » sont définis. Leurs amplitudes relatives varient de 0 à -10 dB, avec respectivement des retards de propagation allant de 0,2 μ s à 5 μ s. De son côté, le modèle RA-6 préconise le même nombre de multitrajets mais organisés en propagation de type « Rice ».

Lors des expérimentations effectuées dans le cadre du projet CAVITE, un trajet dominant a généralement été observé et, suivant la zone géographique, le nombre de trajets principaux est de l'ordre de 2 ou 3 affectés de retards de propagation de 1 à 2 μ s. La décroissance dans ce cas, est nettement plus importante, d'environ -10 dB/ μ s. De plus, des trajets secondaires ont été observés autour des trajets principaux dans un étalement moyen de 0,5 μ s, avec une pente d'environ -40 dB/ μ s. D'autres trajets de propagation sont certainement présents mais n'ont pas pu être mesurés du fait de la dynamique du système de réception. Cependant, l'amplitude de ces trajets est au maximum à -20 dB en dessous de celle du trajet principal. Ils n'auront donc que peu d'impact sur un système à diversité de réception. Cette configuration s'apparente à une propagation en « clusters » comme définie par le modèle de Saleh et Valenzuela [21].

Le plus grand étalement des clusters est observé dans les centres villes du fait de l'existence de multitrajets spéculaires présentant une variabilité temporelle importante. Les techniques de diversité vont donc être fortement sollicitées dans ce type d'environnement. Ce phénomène s'observe dans une moindre mesure lors de déplacements sur des voies rapides. Dans ce cas, les trajets de propagation ont des amplitudes et retards relatifs moins élevés liés au plus grand dégagement de l'environnement. L'étalement des retards le plus faible est observé en zone rurale où les différents trajets de propagation sont principalement dus à des phénomènes de diffusion autour du trajet principal.

D'un point de vue spatial, les angles d'arrivée sont contenus dans un seul secteur angulaire lors des déplacements en zone rurale et sur les voies rapides (autoroutes, voies express). La configuration est de type LoS avec une dispersion en élévation faible et inférieure à 15°.

Dans les environnements urbains, une dispersion angulaire est observée à la fois en élévation et en azimut sur chaque direction d'arrivée. En zone urbaine très dense, la présence de clusters de forte amplitude fait apparaître des phénomènes de « canyon » urbain avec des angles quasi-diamétralement opposés.

En conclusion, les différentes campagnes de mesure réalisées montrent l'existence de clusters dans le domaine temps - retard. La propagation des ondes à travers le canal DVB-T est représentable par un modèle de Saleh et Valenzuela [21], habituellement utilisé pour caractériser la propagation à l'intérieur des bâtiments. Les résultats de sondage temporel montrent une présence de signaux autour du premier trajet, qui vont être les plus perturbants dans la réception DVB en mobilité, les autres trajets très distants et souvent très faibles ne seront pas une grande source d'interférence.

La caractérisation du canal de propagation DVB-T montre qu'en dehors des zones urbaines denses, la dispersion angulaire des multitrajets est faible. Ainsi, la qualité de la réception peut être améliorée grâce à un récepteur utilisant la formation de faisceau d'antennes ou la commutation d'antennes à diagramme sectoriel. Dans les zones urbaines, l'utilisation d'un récepteur à diversité est à préconiser. Cette diversité peut être apportée par l'écartement spatial des antennes mais peut aussi être envisagée par l'utilisation d'antennes hétérogènes co-localisées [1,2] ou non. Une poursuite de ce travail est envisageable dans cette thématique ainsi que dans le développement d'algorithmes de combinaison des signaux issus d'un récepteur à diversité.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional de Bretagne ainsi que le Fond National d'Aménagement et de Développement du Territoire pour leur soutien à ce projet.

Références bibliographiques

- [1] A. Bisiaux, L. Bertel, C. Barratt, D. Lemur, « *TRILION project: Transmission of images through the ionosphere* », Eighth IEE International Conference on HF Radio Systems and Techniques, UK, juillet 2000.
- [2] C. Perrine, Y. Erhel, D. Lemur, A. Bourdillon, N. Melida N, « *1300 km HF radio link with a 30 kbits/s data transfer rate* », Tenth IET Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques, UK, juillet 2006.
- [3] C. Brousseau, S. Avrillon, F. Nivole, L. Bertel, « *Vectorial characterization of DVB-T propagation channel – Application to radio-Mobile communications: the "CAVITE" Project* », EUCAP2007 – European Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, novembre 2007.
- [4] VALIDATE, « *Project Final Report – WP6. AC-106* », CEC Deliverable number AC106/BBC/DR/021/P/a1, <http://www.bbc.co.uk/rd/projects/validate/VALIDATE.pdf>, juin 1998.
- [5] P. Christ, P. Pogrzeba, « *Introducing mobile multimedia broadcasting services* », ECMAS'T'99 - European Conference on Multimedia Applications, Services and Techniques, Madrid, Espagne, mai 1999.

- [6] J.M. Fernandez, J. Capdevilla, R. Garcia, S. Cabanillas, S. Mata, A. Mansilla, J.M. Fernandez, « *Single frequency networks for digital video broadcasting* », ECMAST'99 - European Conference on Multimedia Applications, Services and Techniques, Madrid, Espagne, mai 1999.
- [7] U. Schiek, F. Klinkenberg, « *The MCP terminal: A future platform for mobile services* », MMC2001 - Workshop on Multiradio Multimedia Communications, Berlin, Allemagne, novembre 2001.
- [8] G. Faria G, « *Mobile DVB-T using antenna diversity receivers* », IBC2001 - International Broadcast Conference, Amsterdam, Pays-Bas, Septembre 2001.
- [9] CONFLUENT, « Report on enhancements to receiver architecture and the limits of a real demodulator and processor chip in a portable and mobile environment », IST-2001-38402, CEC Deliverable number D2.3/Task 2.3/part 1, <http://www1.dibcom.info/Images/Upload/pdf/Publications/Confluent.pdf>, novembre 2003.
- [10] A. Guena, D. Zapparata, A. Sibille, G. Pousset, « *Mobile diversity reception of DVB-T signals using roof or windows antennas* », 9th Management Committee Meeting - COST 273 "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks", Athènes, Grèce, janvier 2004.
- [11] J.D. Mitchell, J.A. Green, « *Diversity reception of digital terrestrial television (DVB-T)* », BBC R&D White Paper (WHP 058), British Broadcasting Corporation, <http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP058.pdf>, avril 2003.
- [12] G. Pousset, « *Broadcast goes mobile. From DVB-T to DVB-H* », MMC2005 - Workshop on Multiradio Multimedia Communications, Berlin, Allemagne, janvier 2005.
- [13] G. Pousset, « *Broadcast goes mobile. From DVB-T to DVB-H* », Workshop on Mobile Broadcasting – Technological Developments, Markets Opportunities Regulations and Policy, Bruxelles, Belgique, février 2006.
- [14] ETSI, « *Digital video broadcasting system for television, sound and data services: Draft pr ETS 300 744* », EN300744 Specifications, http://www.bjpace.com.cn/data/tec/tec-DVB/DVB%20BlueBook%20Standards/Specifications%20Standards/transmission/dvb-t/En300744_el.pdf, Mar. 1997.
- [15] F. Nivole, C. Brousseau, S. Avrillon, D. Lemur, F. Marie, L. Bertel, « *Comparison of antennas performances for COFDM DVB-T system – Application to channel sounding* », EUCAP2007 - 2nd European Conference on Antennas and Propagation, Edimbourg, Ecosse, novembre 2007.
- [16] C.W. Harrison, « *Folded dipoles and loops* », IRE Transactions on Antennas Propagation, vol. AP-9, no. 2, pp. 171-187, mars 1961.
- [17] ETSI, « *Digital video measurement guidelines for DVB system TR 101 290 V1.2.1* », <http://broadcasting.ru/pdf-standard-specifications/measurement/tr101290.v1.2.1.pdf>, mai 2001.
- [18] P. Combelles, C. Del Toso, D. Hepper, D. Legoff, J.J. Ma, P. Roberston, F. Scalise, L. Soyer, M. Zamboni, « *A receiver architecture conforming to the OFDM based digital video broadcasting standard for terrestrial transmission (DVB-T)* », ICC98 - IEEE International Conference on Communications, Turin, Italie, juin 1998.
- [19] J. Capon, « *Maximum-likelihood spectral estimation* », Springer-Verlag, 1979.
- [20] R.O. Schmidt, « *Multiple emitter location and signal parameter estimation* », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, N°3, mars 1986.
- [21] A.M. Saleh, R.A. Valenzuela, « *A statistical model for indoor multipath propagation* », IEEE Transactions on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, février 1987.
- [22] F. Molisch, « *Wireless Communication* », IEEE Press - Wiley, Chichester, UK, 2005.